

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

NÁVRH REVERBERÁTORU PRO SIMULACI AKUSTIKY PROSTORU

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

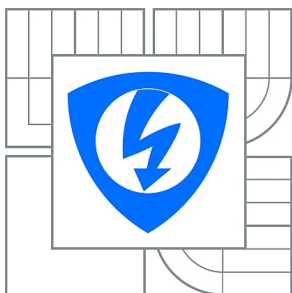
Bc. JOZEF HÚSERKA

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

NÁVRH REVERBERÁTORU PRO SIMULACI AKUSTIKY PROSTORU

DESIGN OF REVERBERATOR FOR ROOM ACOUSTICS SIMULATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JOZEF HÚSERKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DAVID KURC

BRNO 2014



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Jozef Húserka

ID: 106484

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Návrh reverberátoru pro simulaci akustiky prostoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte parametry popisující vlastnosti struktur pro simulaci akustiky prostoru a jejich souvislost s parametry popisujícími akustiku prostoru. Navrhněte několik struktur pro simulaci akustiky prostoru podle objektivních kritérií kvality poslechových prostorů a implementujte je v prostředí Matlab. Vlastnosti struktur ověřte a porovnejte pomocí simulace a experimentu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Doňar, B., Zaplatílek, K., MATLAB - začínáme se signály. Ben, technická literatura, Praha, 2006.
ISBN: 80-7300-200-0
- [2] Poletti, M. A., The Performance of Multichannel Sound Systems, The University of Auckland, October 1999, Auckland, doctoral thesis.
- [3] Kim, Y. H., Ahn S.T., Reverberation Model Based on Objective Parameters of Subjective Perception, AES Journal Vol. 49, No. 9, September 2001

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 30.5.2014

Vedoucí práce: Ing. David Kurc

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Práca sa zaoberá simulovaním akustických priestorov pomocou reverberátorov. Výstupom z práce sú algoritmy implementujúce štyri reverberátory a skript počítajúci objektívne parametre akustického priestoru z impulzných odoziev. Reverberátory boli implementované v prostredí Matlab. K všetkým reverberátorom boli vytvorené grafické rozhrania na zjednodušenie ich používania. Prvá časť kapitoly sa zaoberá objektívnymi parametrami akustického priestoru a spôsobom ich počítania z impulznej odozvy. V druhej kapitole sú popísané štruktúry z ktorých sú vytvorené implementované reverberátory v tretej kapitole. Tá okrem implementácie obsahuje aj ich porovnanie. V záverečnej kapitole bolo prevedené meranie impulzných odoziev troch priestorov a ich aproximovanie pomocou implementovaných reverberátorov.

Kľúčové slová: Reverberátor, Hrebeňový filter, Fázovací článok, FIR filter, Impulzná odozva, FDN, Matlab, Objektívne parametre akustického priestoru, Oneskorenie, Prenosová funkcia

Abstract

This thesis deals with artificial simulation of acoustic spaces by using reverberators. Output of this document consists of four reverberation algorithms and function that evaluates objective parameters of acoustic space from impulse responses. Reverberators and script were implemented using Matlab. Graphical user interface is used to present all of the algorithms for easier usability. First chapter deals with objective parameters of acoustic spaces and the ways they are computed from impulse response. Second chapter describes various structures which are used to build reverberators. Those structures are used in third chapter in implementations of reverberators. Third chapter also compares all implemented reverberators. In last chapter experiment was made. Impulse responses of three spaces were measured and subsequently approximated by algorithms implemented in this thesis.

Keywords: Reverberator, Comb Filter, Allpass Filter, FIR Filter, Impulse response, FDN, Matlab, Objective parameters of acoustic space, Delay, Transfer Function

HÚSERKA, J. *Návrh reverberátoru pro simulaci akustiky prostoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 78 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Kurc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Využití reverberátorů pro úpravu akustiky prostoru“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení S 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád by som poďakoval vedúcemu diplomovej práce pánovi Ing. Davidovi Kurcovi, za cennú odbornú pomoc pri vypracovaní práce.

Brno

.....

(podpis autora)

Obsah

Úvod.....	8
1 Šírenie zvuku v priestore.....	9
1.1 Impulzná odozva priestoru.....	10
1.2 Objektívne akustické parametre priestoru.....	12
1.2.1 Schroederov integrál.....	12
1.2.2 Doba dozvuku RT (Reverberation Time).....	13
1.2.3 Počiatočná doba dozvuku EDT (Early Decay Time).....	13
1.2.4 Miera hlbokých a vysokých tónov.....	14
1.2.5 Miera priameho zvuku C_7	14
1.2.6 Miera zreteľnosti C_{50}	15
1.2.7 Miera jasnosti C_{80}	15
1.2.8 Sila zvuku G.....	16
1.2.9 Čas ťažiska impulznej odozvy ts.....	16
1.2.10 Počiatočné oneskorenie ITDG (Initial Time Delay Gap).....	17
1.2.11 Činiteľ inter aurálnej vzájomnej korelácie IACC(Inter Aural Cross correlation Coefficient).....	17
1.2.12 Zreteľnosť D_{50} (Objective clarity).....	18
1.2.13 Miera doznievania H (Reverberance Measure).....	18
1.2.14 Kritérium ozveny EK (Echo Criterion).....	19
2 Stavebné bloky reverberátorov.....	20
2.1 Oneskorenie.....	20
2.2 Filter FIR (Finite Impulse Response).....	21
2.3 Hrebeňový filter.....	25
2.4 Dolná priepustnosť.....	30
2.5 Fázovací článok.....	32
3 Implementácia reverberátorov.....	37
3.1 Jotov Reverberátor.....	37
3.2 Rafiiho reverberátor.....	43
3.3 Dattorrov reverberátor.....	47
3.4 Väänänenovej reverberátor.....	51
3.5 Porovnanie implementovaných reverberátorov.....	53
3.6 Postupy pri implementácii reverberátorov.....	57
4 Meranie impulznej odozvy.....	60
5 Záver.....	66
Literatúra.....	67
Zoznam použitých skratiek a symbolov.....	70
Zoznam príloh.....	71
A Aproximované impulzné odozvy reálnych priestorov.....	72
B DVD príloha.....	78

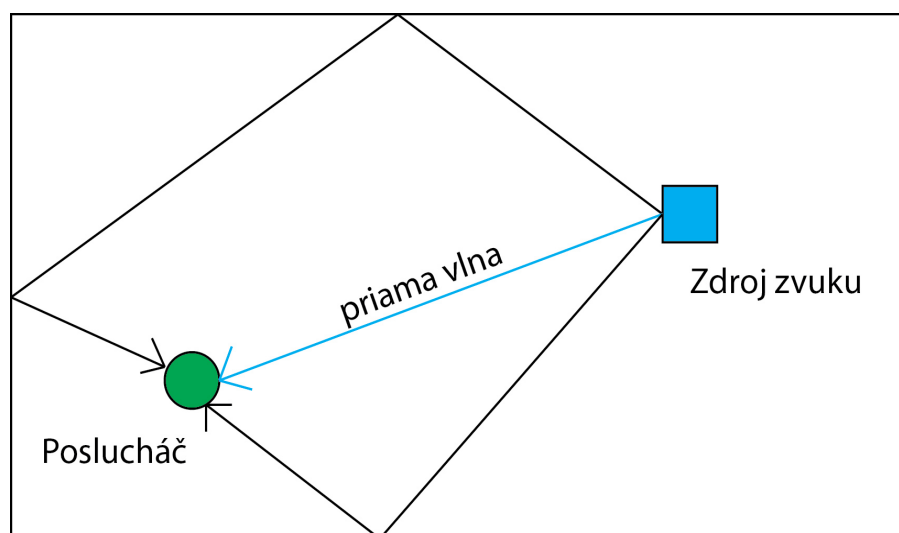
Úvod

Kvalitná reprodukcia zvuku je pre ľudstvo dôležitá už mnoho storočí. Dokazujú to mnohé pokusy o vybudovanie akusticky kvalitného priestoru už z čias antického Grécka. V tomto období akustika ešte nebola považovaná za vedeckú disciplínu. Ľudstvo si však už pomaly začínalo uvedomovať jej dôležitosť o čom svedčia spisy z obdobia Rímskej ríše zaoberajúce sa akustikou divadelných priestorov. Skutočný rozvoj akustiky ako vedy však prišiel až v 19. storočí a v súčasnosti je to významný vedný obor. S rozvojom technológie je dnes reprodukcia zvuku možná prakticky kdekoľvek a vo veľkej kvalite. Uplatnenie tejto vedy pritom nespočíva iba v hudbe a reprodukcii, prípadne v zázname zvuku – akustika sa zaoberá aj frekvenciami, ktoré nie sú ľudským uchom počuteľné, no napriek tomu sú využívané v rozličných oblastiach ľudského života. Jednou z významných častí akustiky je skúmanie akustických vlastností priestoru a následná úprava týchto vlastností, prípadne umelé vytvorenie akustického priestoru na základe žiadaných vlastností reprodukcie. Tento proces sa nazýva reverberácia. Je to komplexný proces zahŕňajúci viac fáz a jeho popis tvorí gro tohto dokumentu. Zariadenie, respektíve algoritmus, ktorý umelo vytvára akustický priestor sa nazýva reverberátor.

Cieľom tejto práce je popísať objektívne akustické parametre priestoru, ukázať ako sa viažu k parametrom stavebných prvkov reverberátorov a navrhnúť v Matlabe niekoľko algoritmov ktoré budú simulovať akustický priestor. Praktická časť práce spočíva v zmeraní impulznej odozvy priestoru v laboratórnych podmienkach. Prvá kapitola práce sa venuje základom šírenia zvuku, získavaniu impulznej odozvy priestoru a jej následnom význame pri určovaní objektívnych parametrov akustického priestoru, ktoré sú v tejto kapitole popísané a zadefinované. Druhá kapitola sa venuje vybraným stavebným blokom reverberátorov, popisuje ich vlastnosti a parametre. Sú tu uvedené blokové schémy jednotlivých štruktúr, ich prenosové funkcie a je tu popísané ich využitie v celkovom procese reverberácie. Ďalej sa táto kapitola snaží ukázať vplyv nastavenie parametrov týchto štruktúr na objektívne parametre akustického priestoru na príklade reverberátorov realizovaných v tejto práci. K tomu využíva skriptu implementovaného v tejto práci, ktorý z impulzných odoziev reverberátorov vypočíta objektívne parametre akustického priestoru. Tretia kapitola sa venuje samotnej implementácii reverberátorov. Sú tu uvedené ich schémy, a popísaný princíp získania impulznej odozvy. Ďalej je v tejto kapitole zhodnotená ich celková kvalita na základe objektívnych parametrov a subjektívneho dojmu z reverberácie. Posledná kapitola sa zaoberá praktickou časťou práce – meraniu impulznej odozvy priestoru. Nameranú impulznú odozvu tu porovnávam s impulznými odozvami implementovaných reverberátorov na základe objektívnych parametrov akustického priestoru.

1 Šírenie zvuku v priestore

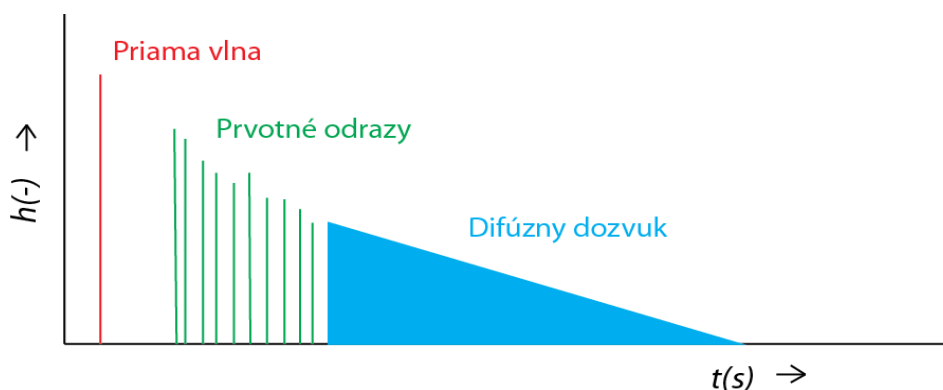
Zvukový vnem v uzavretom priestore je u človeka tvorený dvoma zložkami – priamou vlnou prichádzajúcou zo zdroja zvuku a odrazenými vlnami (obr. 1.1). Pomer energie týchto dvoch zložiek závisí na type priestoru, polohe poslucháča, materiálu tvoriaceho priestor a rôznych iných aspektoch. V uzavretých priestoroch býva bežné, že celková energia odrazených vln je väčšia ako energia priamej vlny. Šírenie zvuku v čase môžeme ideálne vyjadriť pomocou impulznej charakterisky (obr. 1.2). Odrazené vlny sa delia na prvotné odrazy a difúzny dozvuk. Rovnako je možné vidieť, že energia odrazených vln je menšia ako energia priamej vlny – je to spôsobené absorpciou stien, respektíve vzduchu. Napriek absorpcii je súčet energie prvotných odrazov a difúzneho dozvuku väčší ako energia priamej vlny. Obvykle je väčšina zvukovej informácie produktom samotnej reverberácie. S rastúcim časom hustota odrazených vln stúpa a je čoraz ťažšie rozoznať jednotlivé echá, respektíve odrazy – na obrázku 1.2 je toto reprezentované celistvým vyfarbením priebehu difúzneho dozvuku. Hoci súčet energie vln vo fáze difúzneho dozvuku je pomerne veľký, pri špecifických prípadoch často nenesie takmer žiadnu podstatnú informáciu – môžeme si to všimnúť predovšetkým pri reči. So zvyšujúcimi nárokmi na akustiku priestorov prišla potreba tieto priestory popísať tak, aby sme mohli z daného popisu odvodiť čo najviac informácií o akustických vlastnostiach skúmaného priestoru. Ako ideálny aparát na skúmanie akustických vlastností priestoru sa ukázala byť impulzná odozva priestoru. Pomocou nej je priestor kompletne popísaný, a môžeme z nej získať všetky potrebné parametre, ktoré tento priestor popisujú a sú ďalej definované v tejto kapitole.



Obr. 1.1: Šírenie zvuku v uzavretom priestore.

1.1 Impulzná odozva priestoru

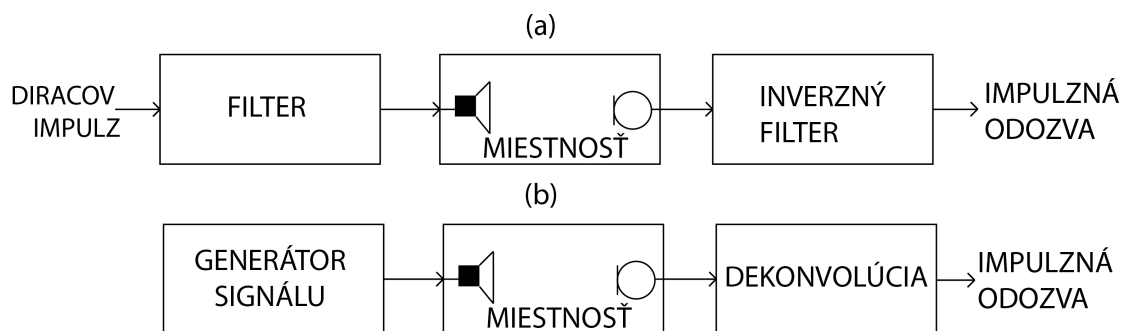
Je to výstupný signál, ktorý systém vyprodukuje zo vstupného signálu v podobe Diracovho impulzu [2,17]. Ak si priestor predstavíme ako uzavretý systém a zvolíme vhodný druh signálu a správnu metodiku získania impulznej odozvy, systém je ňou kompletne popísaný. Problém však nastáva pri voľbe vyhovujúceho signálu. Diracov impulz nie sme schopní v realite reprodukovat', nakoľko je to iba teoretický model. Je to nekonečne úzky impulz, ktorého energia je rovná prevrátenej hodnote jeho šírky, čiže nekonečnu. Obsahuje všetky frekvencie od nuly až po polovicu vzorkovacieho kmitočtu, s rovnakou energiou a známou fázou. Jednou z možností ako reprodukovat' signál v časovej oblasti podobný Diracovmu impulzu je vyprodukovat' veľmi krátky zvuk s dostatočne veľkou energiou. Na tieto účely sa používa napríklad zvuk prasknutého balónu, prípadne štartovacej pištole. Takto získaná impulzná odozva však nepopisuje priestor dostatočne na to, aby sme z nej mohli s uspokojúcou presnosťou určiť objektívne parametre akustiky priestoru [1, 6, 19]. Dá sa z nej určiť napríklad doba dozvuku koncertnej haly, ale na iné použitia táto metodika nie je príliš vhodná a v súčasnosti už je nahradená inými metódami dosahujúcimi oveľa presnejšie výsledky.



Obr. 1.2: Impulzná odozva uzavretého priestoru.

Jednou z hlavných nevýhod metódy popísanej vyššie je, že akustický signál výstrelu, alebo iný krátky impulz neobsahuje všetky frekvencie v rovnakom pomere ako Diracov impulz. V digitálnych systémoch, ako napríklad pri implementácii reverberátorov v tejto práci je Diracov impulz možné pomerne jednoducho reprodukovat', no v realite je to neefektívne, keďže odstup signálu od šumu nebude dostatočný. Nie sme schopní reprodukovat' jednotkový impulz s takou energiou aby nedošlo k nelineárnemu zkresleniu a stále bol použiteľný pre účely merania. [1] Jednou z možností ako vyriešiť problém reprodukcie krátkeho signálu s dostatočnou energiou na to aby bol odstup signálu od šumu použiteľný pre efektívne meranie impulznej odozvy, je rozloženie signálu do dlhšieho časového úseku filtráciou a následným

inverzným filtrovaním získať tú časť signálu ktorú potrebujeme. Na takomto princípe fungujú v súčasnosti dve z najpoužívanejších metód merania impulznej odozvy – meranie postupnosťami s maximálnou dĺžkou MLS (Maximum Length Sequences) a prechod sínusoidy kmitočtovým spektrom. Spôsob akým môžeme získať impulznú odozvu zo systému vybudeného takýmto spôsobom je zobrazený na obrázku 1.3. Predpokladajme, že máme filter s komplexnou kmitočtovou odozvou $H(\omega)$. Pokiaľ má filter nenulové zosilenie na všetkých frekvenciách, je možné k nemu nájsť inverzný filter s kmitočtovou odozvou $R(\omega) = z^n/H(\omega)$, kde z^n je oneskorenie, ktoré je potrebné, aby bol takýto filter kauzálny, a tým pádom realizovateľný. V prípade, že dáme tieto filtre za seba sériovo, ostane nám iba oneskorenie, ktoré je nám známe. Ak predpokladáme, že filtre i meraný systém sú lineárne, môžeme tento systém zaradiť medzi tieto filtre a získať tak impulznú odozvu z filtrovaného Diracovho impulzu. V praxi sa však miesto filtrovaného Diracovho impulzu používa generovaný signál, a miesto inverzného filteru sa používa dekonvolúcia. Toto je princípom oboch nižšie spomínaných metód. [1,12]



Obr. 1.3: Princíp merania impulznej odozvy pri metódach MLS a prechode sínusoidy cez frekvenčné spektrum. a) Teoretický model b) Použitie v realite.

Meranie s postupnosťami s maximálnou dĺžkou MLS – ide o metódu založenú na generovaní pseudonáhodných binárnych postupností. Postupnosti sú periodické s periódou $L=2^N-1$, kde N je prirodzené číslo. Takýto audio signál má rovnaké spektrum ako Diracov impulz s tým rozdielom, že pri rovnakej amplitúde je energetické spektrum N krát väčšie. Inverzné filtrovanie takéhoto signálu sa dá efektívne realizovať pomocou rýchlej Hadamardovej transformácie. V prípade, že by sme ešte viac chceli zvýšiť odstup signálu od šumu, je túto postupnosť možné ďalej filtrovať tak aby sme dosiahli miesto spektra bieleho šumu, spektrum šumu ružového. Nevýhodou tohto merania je náchylnosť na nelineárne skreslenie vznikajúce pri reprodukcii signálu cez reproduktory. [4]

Prechod sínusoidy frekvenčným spektrom – existujú dva typy prechodov ktoré sú vhodné na tento druh merania – lineárny a logaritmický. K obom je pomerne

jednoduché vypočítať inverzný filter – pre lineárny prechod je inverzným ten istý signál časovo obrátený oproti pôvodnému. Takýto signál má spektrum bieleho šumu. Pre meranie impulznej odozvy a iné akustické merania je však vhodnejší signál so spektrom ružového šumu, ktorý dosiahneme pokiaľ inverzným filtrom bude opäť časovo obrátený signál, s tým rozdielom, že je modifikovaný o +6 dB na oktávu. V oboch prípadoch je inverzný filter realizovaný pomocou FFT (Fast Fourier Transform) konvolúcie. Výhodou tejto metódy je, že v každom čase produkuje iba jednu frekvenciu a akékoľvek skreslenie sa prejaví iba ako harmonické zložky danej frekvencie. Pokiaľ používame stúpajúci prechod, tieto harmonické zložky budú prítomné ešte predtým ako sa objavia tieto frekvencie v signále prechodu, čo má za následok, že po dekonvolúcií sa toto skreslenie objaví ako špičky v čase mimo zmeranú impulznú odozvu, a tie je možno ľahko odstrániť [12].

Tieto dve metódy sú v súčasnosti pravdepodobne najpoužívanejšími metódami na meranie impulznej odozvy. V prípade, že dodržíme správnu metodiku merania a použijeme správnu techniku v podobe vhodného mikrofónu a reproduktorov, môžeme zo získanej impulznej odozvy získať tzv. objektívne akustické parametre priestoru.

1.2 Objektívne akustické parametre priestoru

Objektívne parametre akustického priestoru slúžia na popísanie priestoru tak, aby človeku ktorý rozumie významu týchto parametrov, boli schopné vytvoriť predstavu o reprodukcii zvuku v danom priestore bez toho, aby sa v ňom nachádzal. Predpokladom k získaniu niektorých z týchto parametrov je výpočet krivky doby dozvuku, inak nazývanej aj Schroederov integrál.

1.2.1 Schroederov integrál

Pôvodne bola krivka doby dozvuku získavaná tak, že po vypnutí zdroja zvuku s meracím signálom v podobe šumu bol mikrofónom zaznamenaný pokles energie až na úroveň hladiny šumu v priestore. Takto sa previedlo viacero meraní, ktoré boli priemerované až sa získala krivka doby dozvuku, prípadne viacero kriviek pre jednotlivé oktávové alebo tretinooktávové pásma ak bol signál filtrovaný pásmovými priepustnosťami. Schroeder však ukázal, že krivka doby dozvuku môže byť meraná so zvýšenou presnosťou spätnou integráciou impulznej odozvy priestoru. Podľa jeho obajviteľa sa tento integrál nazýva aj Schroederov a má tvar

$$S(t) = \int_t^{\infty} p^2(t) dt, \quad (1.1)$$

kde $p(t)$ je impulzná odozva s príchodom priamej vlny odpovedajúcej času $t = 0$. $S(t)$ v podstate reprezentuje zostávajúcu energiu v impulznej odozve v čase t . Ak je tento

integrál vykreslený do grafu v dB vzhľadom k maximálnej hodnote v čase $t = 0$, odpovedá krivke doby dozvuku získanej po vypnutí zdroja zvuku. V praxi sa často využíva krivka dozvuku pre jednotlivé oktavové alebo tretinoktavové pásma. To sa prevedie jednoduchým filtrovaním impulznej odozvy pásmovou priepustnosťou s patričnými medznými kmitočtami. [24,26]

1.2.2 Doba dozvuku RT (Reverberation Time)

Ak sa v priestore kontinuálne reprodukuje zvuk, ktorý náhle vypneme, stále môžeme počuť jeho doznievanie. V akustike sa táto doba po ktorú zvuk doznieva nazýva doba dozvuku. Aby ju bolo možné kvantifikovať, bola zavedená jej definícia ako čas za ktorý klesne hladina zvukovej energie po vypnutí zdroja zvuku na 10^{-6} pôvodnej energie. Vyjadrené v decibeloch, ide o pokles o 60 dB [20]. Doba dozvuku sa označuje ako T_{60} alebo RT . Vypočítame ju, ako dobu poklesu zvuku z hladiny -5 dB na -35 dB vynásobenú dvoma (obr. 1.4). Častokrát podmienky neumožňujú nájsť pokles dozvuku o 60 dB a to je dôvod prečo je táto hodnota iba interpolovaná. V praxi sa najčastejšie hodnota doby dozvuku počíta z impulznej odozvy z ktorej je pomocou Schroederovho integrálu vytvorená dozvuková krivka. V prípade, že chceme dobu dozvuku odhadnúť pre určitý priestor bez merania, existuje viacero spôsobov ako to dosiahnuť. Sabine dobu dozvuku zadal ako

$$T_{60} = 55,3 \frac{V}{\alpha S} = 55,3 \frac{V}{Av} = 0,161 \frac{V}{A} = 0,161 \frac{V}{\sum \alpha_i S_i}, \quad (1.2)$$

kde V je objem miestnosti, α je pohltivosť stien, A je celková pohltivosť stien v miestnosti, v je rýchlosť zvuku a S je plocha stien miestnosti.

Neskôr bolo zistené, že vzťah 1.2 nie je úplne presný, pretože zjednodušuje niektoré okolnosti. V súčasnosti je známe, že tento vzťah poskytuje uspokojivé výsledky len pre priestory s malou absorpciou stien. Výpočet dozvuku bol neskôr spresnený Eyringom a Millingtonom [7,11].

1.2.3 Počiatočná doba dozvuku EDT (Early Decay Time)

Podobne ako doba dozvuku, počiatočná doba dozvuku je doba za ktorú poklesne po vypnutí zdroja zvuku hladina zvukovej energie o 60 dB. Narozdiel od doby dozvuku je však táto hodnota extrapolovaná z poklesu z 0 dB na -10 dB (obr. 1.4). Počas kontinuálneho prehrávania hudby alebo reči sú neskoršie, slabšie časti reverberácie maskované nasledujúcimi slovami prípadne hudbou. Parameter EDT je preto vhodnejším ukazovateľom reverberácie, nakoľko lepšie koreluje so subjektívnym

vnemom dozvuku priestoru, zatiaľ čo doba dozvuku popisuje priestor lepšie z hľadiska jeho fyzikálnych vlastností [24].

1.2.4 Miera hlbokých a vysokých tónov

Je to miera podpory doznievania hlbokých, respektíve vysokých tónov v priestore. Miera hlbokých tónov je definovaná ako

$$BR = \frac{RT_{125} + RT_{250}}{RT_{500} + RT_{1000}}, \quad (1.3)$$

kde RT je doba dozvuku v príslušnom oktávovom pásme (125, 250, 500 a 1000 Hz).

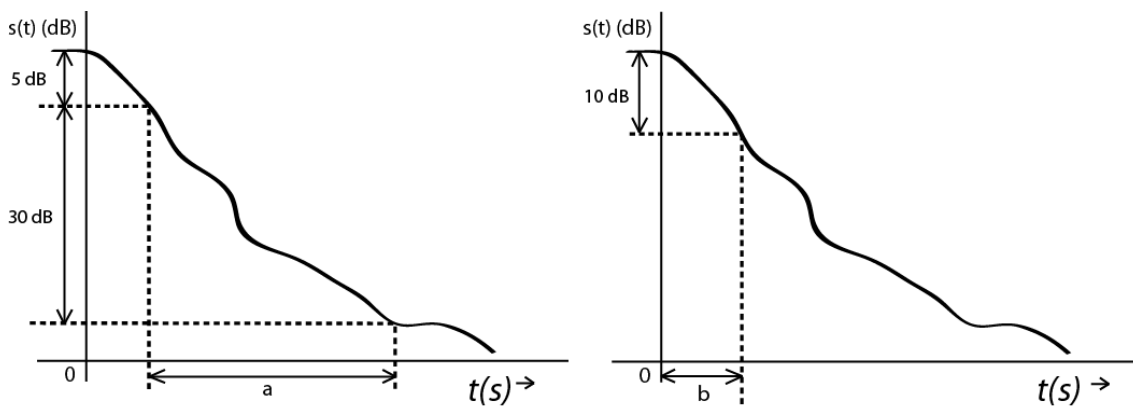
Hodnoty BR (Bass Ratio) by sa pre prijateľnú akustiku sálu mali zvrchu približovať k 1, no nemali by pod túto hodnotu klesnúť.

Miera vysokých tónov je definovaná ako

$$HFR = \frac{RT_{500} + RT_{1000}}{RT_{2000} + RT_{4000}}, \quad (1.4)$$

kde RT je doba dozvuku v príslušnom oktávovom pásme (500, 1000, 2000 a 4000 Hz).

Hodnoty HFR (High Frequency Ratio) by sa pre prijateľnú akustiku sálu mali zdola približovať k 1 a nemali by sa od tejto hodnoty príliš odlišovať [31].



Obr. 1.4: Vľavo vidíme dobu dozvuku $RT = 2a$, vpravo je počiatková doba dozvuku $EDT = 6b$.

1.2.5 Miera priameho zvuku C_7

Udáva pomer medzi energiou zvuku prichádzajúcou do 7 ms a energiou prichádzajúcou po 7 ms. Používa sa k predikcii sily priameho zvuku a udáva sa v decibeloch. Čím

bližšie sa blíži 0 dB, tým lepšie, pričom za spodnú hranicu prijateľnú pre akustický priestor určený na hudobné vystúpenia sa považuje hodnota – 15 dB [20]. Miera priameho zvuku je definovaná vzťahom

$$C_7 = 10 \log \frac{\int_0^{7\text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{7\text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_7}{E_{\infty} - E_7}. \quad (1.5)$$

1.2.6 Miera zreteľnosti C_{50}

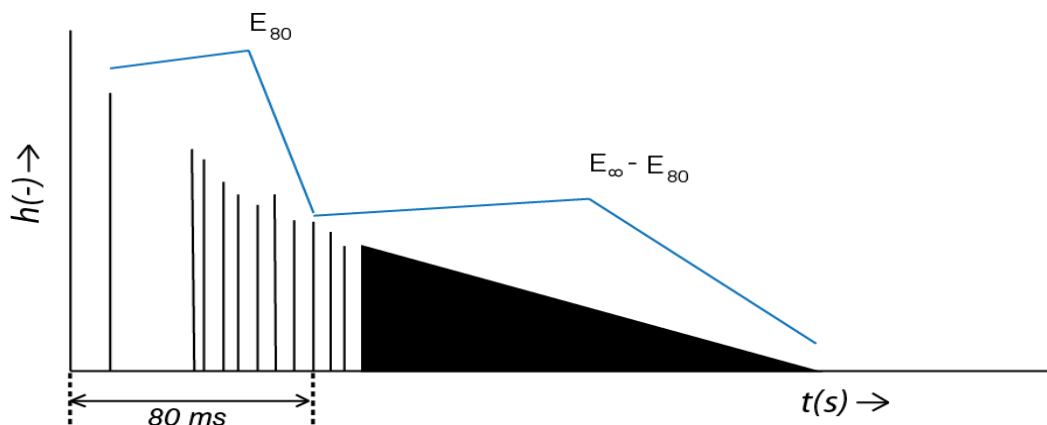
Je to pomer energie prichádzajúcej do 50 ms k energii prichádzajúcej po 50 ms. V literatúre sa označuje ako kritérium zrozumiteľnosti pre reč. Udáva sa v decibeloch a za spodnú prijateľnú hranicu pre prednes reči sa považuje -5 dB, pričom hodnota nad 0 dB určuje miestnosť s dobrou zrozumiteľnosťou hovoreného slova [20]. Je definovaná vzťahom

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50\text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{50\text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_{50}}{E_{\infty} - E_{50}}. \quad (1.6)$$

1.2.7 Miera jasnosti C_{80}

Miera jasnosti popisuje schopnosť vnímať každý detail hudobného predstavenia. Udáva pomer medzi energiou zvuku prichádzajúcou do 80 ms a energiou prichádzajúcou po tomto čase (obr. 1.5). Slúži ako akustické kritérium pre hudbu a udáva sa v decibeloch. Jej ideálna hodnota sa líši pre rôzne druhy hudobných žánrov, všeobecne však môžeme povedať, že by sa mala nachádzať medzi 0 – 8 dB. Čím je vyššia, tým dominantnejší je zvuk prvotných odrazov. V prípade, že je príliš nízka, detail je nejasný a je utlmovaný príliš veľkou energiou difúzneho dozvuku [11]. Koreluje so subjektívnym atribútom jasnosti a schopnosti rozlíšenia jednotlivých tónov v rýchlych hudobných pasážach. Je definovaná ako

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80\text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80\text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_{80}}{E_{\infty} - E_{80}}. \quad (1.7)$$



Obr. 1.5: Miera jasnosti C_{80} .

1.2.8 Sila zvuku G

Odpovedá subjektívnemu parametru hlasitosť. Ide o pomer celkovej zvukovej energie k energii priamej vlny. Ovplyvňuje ako vnímame hlasitosť reverberácie a takisto vnímanie vzdialenosti od zdroja zvuku. Udáva sa v decibeloch a je definovaná ako

$$G = 10 \log \frac{\int_0^\infty p^2(t) dt}{\int_0^\infty p_A^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_\infty}{\int_0^\infty p_A^2(t) dt}, \quad (1.8)$$

kde $p_A(t)$ je impulzná odozva zachytená v referenčnej vzdialenosti 10 m od zdroja zvuku vo voľnom poli. Nakoľko je jednočíselný údaj o miere hlasitosti nedostatočný, v praxi sa používajú miery hlasitosti pre spodné, stredné a vysoké frekvencie. Hodnotu sily zvuku môžeme odhadnúť na základe vzťahu

$$G_{pred} = 10 \log \left(\frac{T_{60}}{V} \right) + 45 \text{ dB}, \quad (1.9)$$

kde T_{60} je doba dozvuku a V je objem miestnosti [6,7].

1.2.9 Čas ťažiska impulznej odozvy t_s

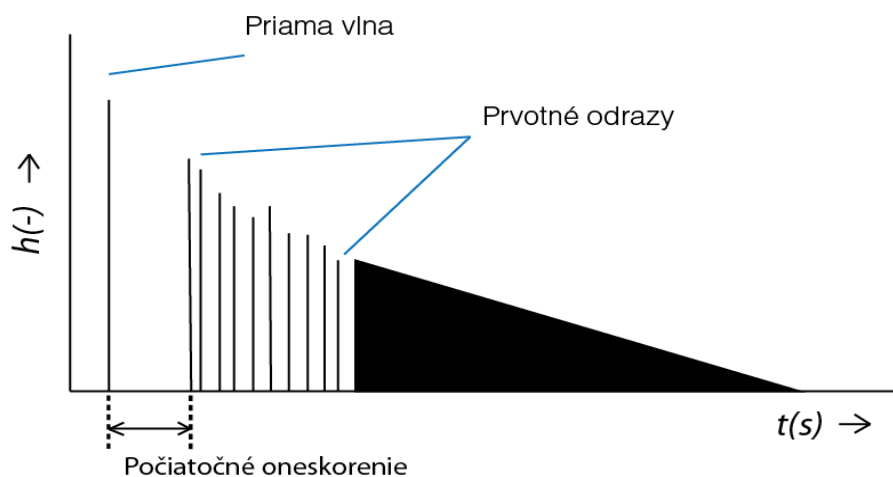
Vypovedajúca hodnota tejto veličiny je spojená s priestorovosťou a jasnosťou pre hudbu a hovorené slovo. Jej hodnota je úzko spätá s hodnotou C_{80} a má aj podobné využitie. Čas ťažiska impulznej odozvy t_s je definovaný ako

$$t_s = \frac{\int_0^\infty t p^2(t) dt}{\int_0^\infty p^2(t) dt} = \frac{\int_0^\infty t p^2(t) dt}{E_\infty}. \quad (1.10)$$

Pre hudbu a oktavové pásmo 1000 Hz sa akceptovateľné hodnoty na kvalitnú reprodukciu zvuku pohybujú v rozsahu 70 až 150 ms, zatiaľ čo pre hovorenú reč v oktavových pásmach je to 60 až 80 ms pre oktavové pásma 500 až 4000 Hz [31].

1.2.10 Počiatočné oneskorenie ITDG (Initial Time Delay Gap)

Udáva oneskorenie prvej odrazenej vlny od priamej vlny (obr.1.6). Na jeho určenie sa využíva impulzná odozva meraná v špecifickom mieste akustického priestoru. Ak má byť dojem zo zvukového vnemu prirodzený, hodnota počiatočného oneskorenia by pre priestory určené na reprodukciu hudby príliš nemala prekračovať hodnotu 20 ms. Jeho subjektívnym ekvivalentom je intímnosť zvukového dojmu pričom Beranek v [8] tvrdí, že priestor s počiatočným oneskorením väčším ako 45 ms nemá žiadnu intimitu.



Obr. 1.6: Počiatočné oneskorenie ITDG.

1.2.11 Činiteľ inter aurálnej vzájomnej korelácie IACC(Inter Aural Cross correlation Coefficient)

Možnosť vnímať a lokalizovať zvuk v priestore je dôsledkom toho, že proces počúvania je binaurálny, tzn. že zvuk vnímame dvoma sluchovými orgánmi. Empiricky bolo dokázané, že so subjektívnym dojmom priestorovosti dobre koreluje činiteľ interaurálnej vzájomnej korelácie, meraný pomocou umelej hlavy, prípadne reálneho poslucháča pri ktorého hlave sú umiestnené mikrofóny. Normalizovaná funkcia interaurálnej vzájomnej korelácie *IACF* je definovaná ako

$$IACF_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t) p_r(t+\tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_r^2(t) dt}}, \quad (1.11)$$

kde $p_l(t)$ je impulzná odozva na vstupe do ľavého ucha a $p_r(t)$ impulzná odozva na vstupe do pravého ucha.

Činiteľ interaurálnej vzájomnej korelácie $IACC$ je definovaný ako maximum z absolútnej hodnoty $IACF$ pri $\tau > -1$ ms a zároveň $\tau < 1$ ms. Hodnota $1-IACC_E$ by sa ideálne mala pohybovať v rozmedzí 0,4 až 1, kde hodnota 1 znamená maximálnu rozdielnosť signálov na oboch ušiach čo odpovedá plne difúznemu zvukovému poľu. Hodnota $IACC_E$ je hodnota $IACC$ získaná pri integračných medziach $t_1 = 0$ ms a $t_2 = 80$ ms [31].

1.2.12 Zreteľnosť D_{50} (Objective clarity)

Hodnota tohto parametru je ekvivalentom hodnoty miery zreteľnosti C_{50} . Je definovaná vzťahom

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50\text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} = \frac{E_{50}}{E_{\infty}}. \quad (1.12)$$

Prepočet medzi C_{50} a D_{50} je definovaný vzťahmi

$$C_{50} = 10 \log \frac{D_{50}}{1 - D_{50}}, \quad D_{50} = \frac{10^{0,1 C_{50}}}{1 + 10^{0,1 C_{50}}}. \quad (1.13, 1.14)$$

1.2.13 Miera doznievania H (Reverberance Measure)

Popisuje dozvukový priestorový dojem hudobného výkonu. Je definovaná pre oktavové pásmo 1000 Hz ako

$$H = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{50\text{ ms}} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_{\infty} - E_{50}}{E_{50}}. \quad (1.15)$$

Jej vzťah s mierou zreteľnosti C_{80} a zreteľnosťou D_{50} môžeme vyjadriť nasledovne

$$H = -C_{50}, \quad H = 10 \log \frac{1 - D_{50}}{D_{50}}. \quad (1.16, 1.17)$$

1.2.14 Kritérium ozveny EK (Echo Criterion)

Je to parameter, ktorý určuje prítomnosť alebo neprítomnosť počuteľnej ozveny. Vychádza z výzkumu Helmutha Haasa [16] z konca 50. rokov. Ten skúšal na vzorke publika rušivosť oneskoreného signálu. Experiment prebiehal tak, že vzorke ľudí bol púšťaný rečový signál nasledovaný tým istým signálom rôznych intenzít oneskoreným o rôzne časy. Výsledok ukázal, že ak oneskoríme signál o 10 až 30 ms, bude vnímaný ako rušivý až v prípade, že jeho intenzita bude o 10 dB väčšia ako intenzita pôvodného signálu. S narastajúcim oneskorením signálu táto hodnota postupne klesá. V 60. rokoch na tento výzkum zopakovali Schubert so Seraphimom na hudobných signáloch.

Dietsch na tieto práce naviazal v 80. rokoch [10]. Vychádza z Kürerovej definície ťažiska druhej mocniny impulznej odozvy, u ktorej sa sleduje priebeh nábehu času ťažiska druhej mocniny impulznej odozvy.

$$t_s(\tau) = \frac{\int_0^{\tau} |p^2(t)|^n t dt}{\int_0^{\tau} |p^2(t)|^n dt} \quad (1.18)$$

kde pre reč $n = 0,67$ a pre hudbu $n = 1$.

Pre kritérium ozveny EK (τ) potom platí

$$EK(\tau) = \frac{\Delta t_s(\tau)}{\Delta \tau_E} \quad (1.19)$$

pričom pre reč je $\Delta \tau_E = 9$ ms a $\Delta \tau_E = 14$ ms pre hudbu. Medze pre takto definované EK sú:

pre reč EK09 $EK_{10\%} > 0,9$ a $EK_{50\%} \geq 1,0$,

pre hudbu EK14 $EK_{10\%} > 1,5$ a $EK_{50\%} \geq 1,8$.

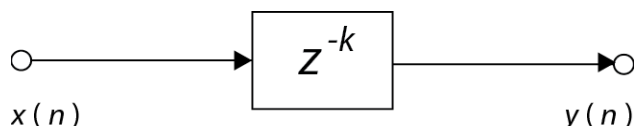
Indexy označujú percento poslucháčov, ktorí sú odrazmi rušení.

2 Stavebné bloky reverberátorov

Každý reverberátor sa skladá z viacerých štruktúr ktoré sú vo výslednom zapojení schopné simulovať akustiku priestoru. Tieto štruktúry majú svoje vlastné parametre, ktorých nastavenie ovplyvňuje výslednú impulznú odozvu reverberátoru, a tým pádom aj akustický dojem zo spracovávaného zvuku. Táto kapitola popisuje tieto stavebné bloky reverberátorov a snaží sa popísať spojitosť medzi nastavením ich parametrov a objektívnymi parametrami akustického priestoru. Z praktického dôvodu je kapitola zameraná iba na štruktúry, ktoré sú využité pri implementácii algoritmov v tretej kapitole tejto práce. Pre každý druh reverberátoru sa môže zmena niektorého parametru štruktúr popísaných nižšie prejaviť inak. Aby bolo možné porovnať ako sa prejaví zmena daného parametru na celkových vlastnostiach reverberátoru, bol vytvorený skript v Matlabe, ktorý z impulznej odozvy reverberátorov určí objektívne parametre akustického priestoru simulovaného reverberátormi.

2.1 Oneskorenie

Je základným stavebným prvkom reverberátorov i všetkých filtrov popisovaných v tejto kapitole. Jeho blokovú schému môžeme vidieť na obrázku nižšie.



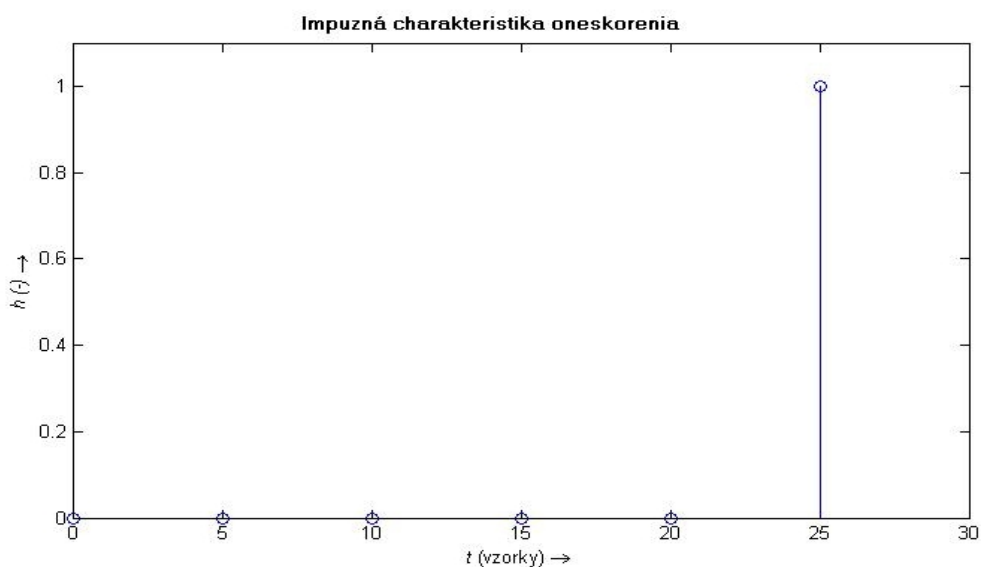
Obr. 2.1 : Bloková schéma oneskorenia.

Prenosová funkcia oneskorenia je

$$H(z) = z^{-k}. \quad (2.1)$$

Úloha oneskorenia je pomerne zjavná – oneskoruje signál o k vzorkov (obr. 2.2). Oneskorenie je ovládané jediným parametrom – hodnotou oneskorenia vo vzorokoch. Impulzná odozva oneskorenia nadobúda hodnoty 1 v bode oneskorenia o k vzorkov, v ostatných hodnotách je rovná 0. Modulová kmitočtová charakteristika oneskorenia je konštantná a fázová charakteristika klesá s narastajúcim k podľa závislosti $k \cdot 180^\circ$, pričom táto hodnota sa objavuje na polovici vzorkovacieho kmitočtu. Jeho náväznosť na objektívne parametre akustického priestoru môže byť rôzna v závislosti na jeho

umiestnení v celkovej štruktúre reverberátoru. Málokedy je súčasťou reverberátoru osamote, väčšinou je súčasťou nadradeného stavebného prvku, napríklad v podobe hrebeňového filtra, alebo fázovacieho článku. Všeobecne však platí, že vo väčšine štruktúr môže príliš veľká hodnota oneskorenia k spôsobiť stratu kontinuálneho dojmu z reverberácie – v tomto prípade reverberáciu vnímame viac ako sled ozvien a nie ako simuláciu priestoru. Nastavenie oneskorenia je kritické napríklad pri prvotných odrazoch modelovaných pomocou FIR filtra – prvé oneskorenie na tomto filtri odpovedá objektívnemu parametru ITDG. V prípade, že je oneskorenie príliš veľké, prvotné odrazy dorazia príliš neskoro, čo má za následok stratu intímnosti zvukového poľa. Nesprávne nastavenie oneskorenia v jednotlivých štruktúrach popísaných v tejto kapitole negatívne ovplyvní všetky objektívne parametre akustického priestoru.



Obr. 2.2: Impulzná charakteristika oneskorenia, s parametrom oneskorenia $k=25$.

V praxi je pri dizajnovaní reverberátorov empirické nastavovanie parametrov jednotlivých štruktúr minimálne rovnako dôležité a časovo náročné ako samotná realizácia štruktúry a algoritmu reverberátoru, preto je mimoriadne dôležité venovať tejto časti návrhu reverberátoru dostatok času.

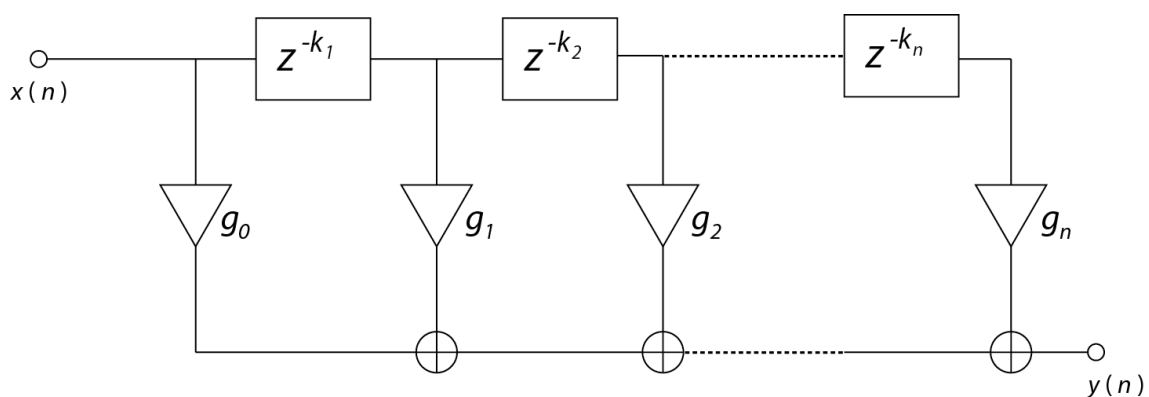
2.2 Filter FIR (Finite Impulse Response)

Ako už názov napovedá, FIR filter má konečnú impulznú odozvu. Jeho bloková schéma je zobrazená na obr. 2.3. Dĺžka impulznej odozvy FIR filtra je $k + 1$ vzorkov. V reverberátoroch sa tento druh filtra najčastejšie používa na modelovanie prvotných odrazov. Výhodou je, že je možné zadať impulznú odozvu tohto filtra vzorku po vzorke, ale rovnako je možné ju aj vygenerovať. Pri jej definovaní každé zosilenie

príslušiacie k oneskoreniu priamo udáva hodnotu špičky v impulznej odozve (obr. 2.4). Prenosová funkcia FIR filtru má tvar

$$H(z) = g_0 + g_1 z^{-k_1} + g_2 z^{-k_2} + \dots + g_n z^{-k_n}. \quad (2.2)$$

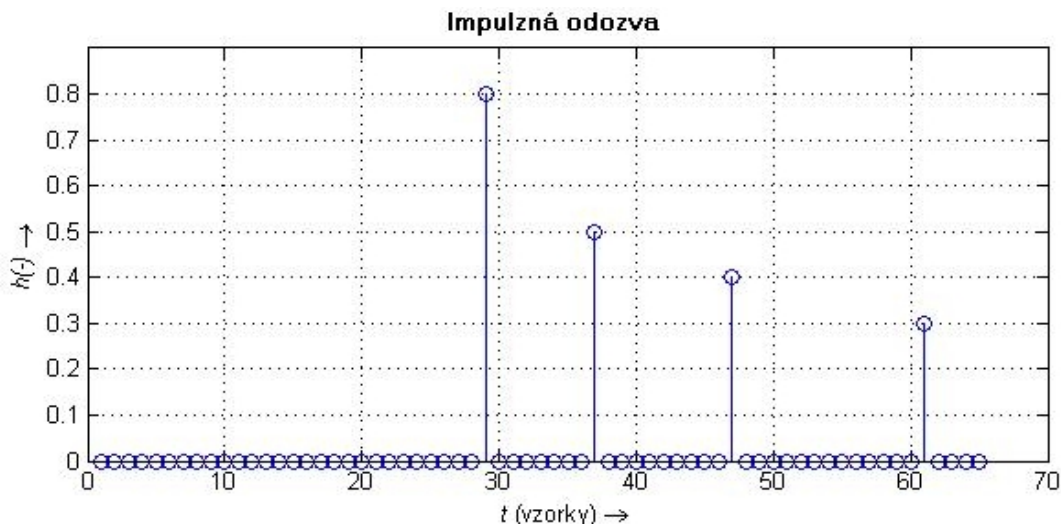
Nastavenie parametrov oneskorenia môže ovplyvňovať viacero objektívnych akustických parametrov. Ak je tento druh filtru použitý na modelovanie prvotných odrazov, parametre najviac ovplyvnené nastavením FIR filtru budú tie, ktoré pracujú s energiou impulznej odozvy v časovej oblasti zhruba do 100 ms – miera zreteľnosti C_{50} , miera jasnosti C_{80} , sila zvuku G , miera doznievania H , počiatkové oneskorenie ITDG. Platí však, podobne ako pri ostatných štruktúrach v tejto kapitole, že zmena nastane takmer vo všetkých objektívnych parametroch, či už menšia alebo väčšia.



Obr. 2.3: Bloková schéma FIR filtru.

Existuje viac možností ako zapojiť FIR filter do celkovej schémy reverberátora. Dva najpoužívanejšie zapojenia sú sériovo a paralelne s časťou reverberátora vytvárajúcou mnohonásobné odrazy. Obe zapojenia majú svoje výhody a nevýhody. Sériové zapojenie je principiálne najjednoduchšie. Modul prvotnej reverberácie realizovaný FIR filtrom je zapojený na vstup signálu, nasleduje váhovacie zosilenie a následne modul pre mnohonásobné odrazy. To samozrejme platí iba v prípade, že pracujeme s mono zvukom, čo je u reverberácie zriedkavé. V prípade, že chceme dosiahnuť stereo reverberácie, je výstup FIR filtru zdvojený, pričom každá vetva je váhovaná vlastným zosilením. Tieto váhovacie zosilenia sa dajú využiť k panorámovaniu signálu medzi ľavým a pravým kanálom. Sériové zapojenie má výhodu predovšetkým v tom, že prvotné odrazy zadefinované vo FIR filtri sú privedené na vstup bloku difúzneho dozvuku, čo sa prejaví na celkovom zahutnení impulznej odozvy reverberátora. Toto je samozrejme veľmi žiadané pre realistickú reverberáciu. Na druhej strane nie je možné ovládať presný nástup impulznej odozvy bloku difúzneho dozvuku. Výsledná impulzná odozva sériovo zapojených štruktúr je daná ich konvolúciou, a tak moment kedy začne časť impulznej odozvy neskorej reverberácie je

závislý na nastavení FIR filtra. Toto je v určitých prípadoch značnou nevýhodou.

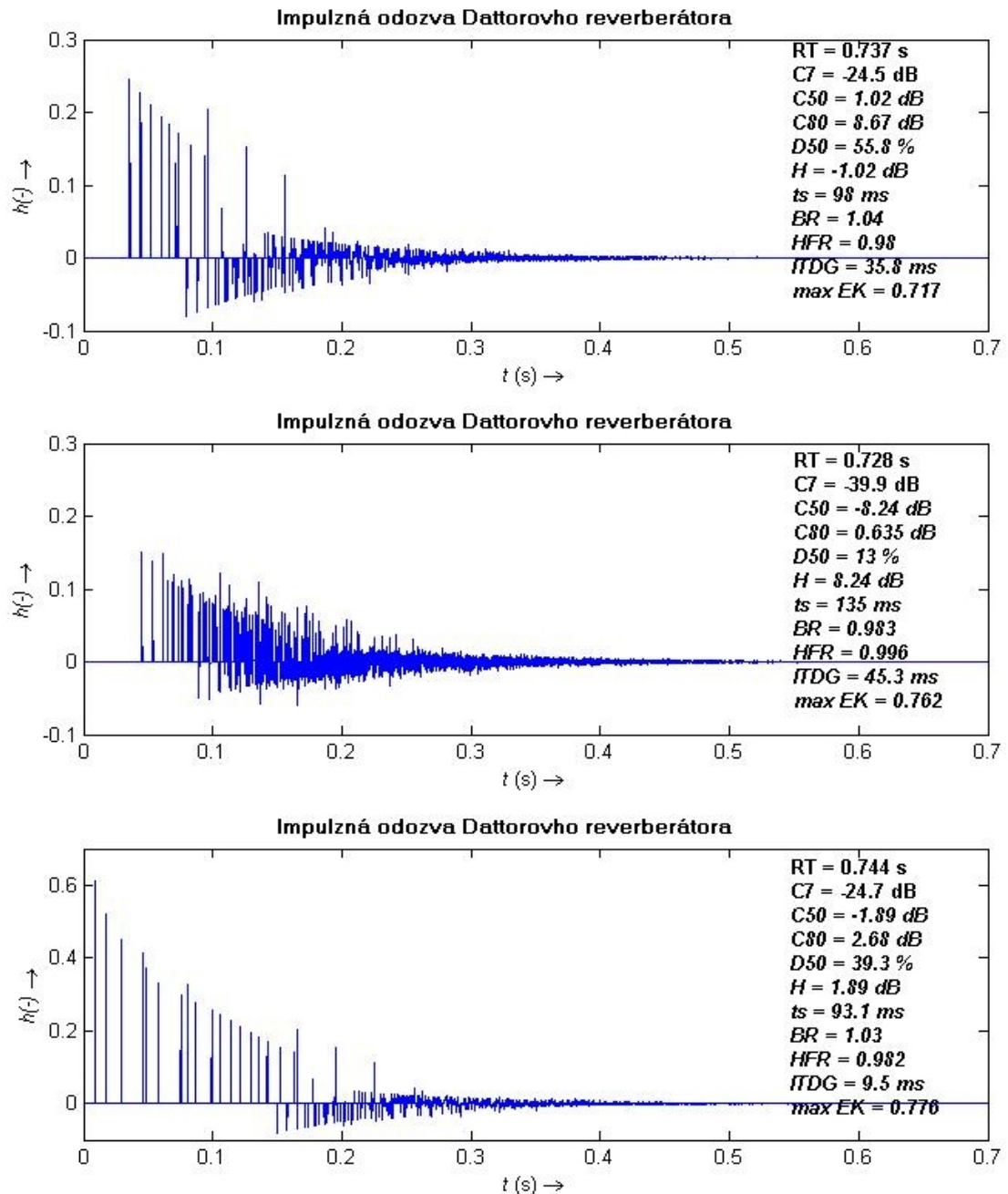


Obr. 2.4: Impulzná odozva FIR filtra s hodnotami oneskorení 29, 37, 47 a 61 vzorkov. Hodnoty zosilenia jednotlivých oneskorení sú 0,8, 0,5, 0,4 a 0,3.

Ďalšiou možnosťou ako zapojiť FIR filter do celkovej schémy reverberátoru je paralelne k vetve vytvárajúcej difúzny dozvuk. Tým odstránime ovplyvňovanie bloku difúzneho dozvuku blokom prvotných odrazov. Každú z týchto štruktúr môžeme nastavovať nezávisle na druhej, čo je výhodné z hľadiska ladenia jednotlivých parametrov reverberátoru, ktoré je pri tomto zapojení značne jednoduchšie. Pred blok neskorej reverberácie je pri tomto zapojení zaradené ešte oneskorenie, ktoré oddeľuje neskorú reverberáciu od samotných prvotných odrazov. Nevýhodou tohto prístupu je nižšia hustota odrazov v celej impulznej odozve, nakoľko nedochádza k zahusťovaniu prvotných odrazov vo fázi difúzneho dozvuku.

Počet parametrov filtra s konečnou impulznou odozvou teda závisí na počte oneskorení, všeobecne však môžeme tieto parametre zjednodušiť do dvoch vektorov – vektor oneskorení a k nemu prináležiaci vektor zosilení. Tieto priamo definujú impulznú odozvu. Pri nastavovaní oneskorení je treba dbať na ich dostatočné rozostupy. V prípade, že sú jednotlivé oneskorenia vzdialené od seba menej ako 1 ms, ľudské ucho nie je schopné vnímať ich ako nezávislé odrazy a vníma ich ako jeden odraz s intenzitou rovnou súčtu oboch odrazov [28]. Toto je dôležité predovšetkým pri modelovaní prvotných odrazov. Mnoho reverberátorov je navrhnutých iba na simuláciu druhej fázy reverberácie – difúzneho dozvuku. Tak je to i s väčšinou reverberátorov implementovaných v tejto práci. Prvotné odrazy je samozrejme možné jednoducho doplniť, čo často prináša značne rozdielne výsledky v celkovom subjektívnom dojme z reverberácie i samotných objektívnych parametroch simulovaného akustického priestoru. Na obrázku 2.5 môžeme vidieť impulzné odozvy modifikovaného Jotovho

reverberátoru implementovaného v tejto práci pri rôznych zapojeniach FIR filtra. Môžeme vidieť, že rozdiely sú často dramatické. Nastavenia FIR filtra pri simulácií prvotných odrazov je kľúčové pre celý dojem z reverberácie.

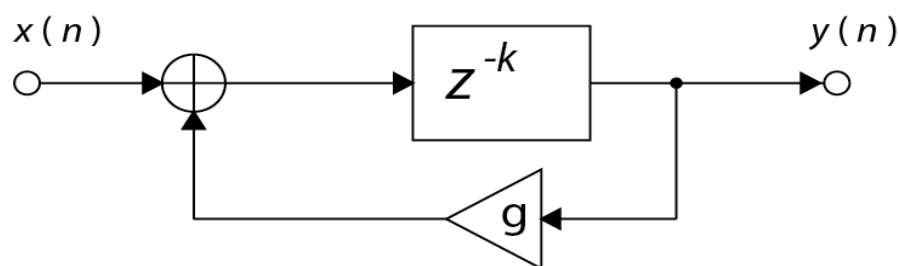


Obr. 2.5: Hore je implementácia upraveného Jotovho reverberátora bez FIR filtra, s FIR filtrom zapojeným sériovo k oneskoreniam v jednotlivých linkách FDN siete, a najnižšie FIR filter zapojený paralelne k spätnoväzbovej sieti. Parametre FIR filtra sú na všetkých príkladoch rovnaké, v paralelnom zapojení je pred FDN sieť pridané oneskorenie. Na obrázku sú zobrazené i vybrané objektívne parametre odpovedajúce danému zapojeniu.

2.3 Hrebeňový filter

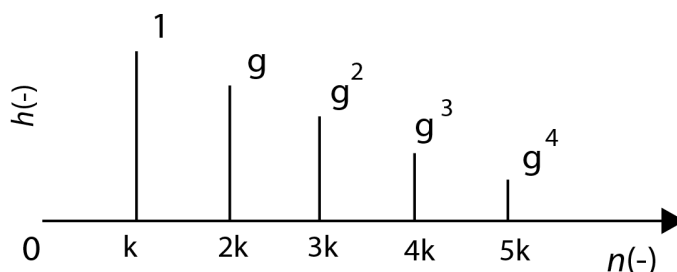
Je to filter typu IIR (Infinite Impulse Response), jeho impulzná odozva je teda nekonečná. V praxi sa modeluje pomocou konečnej impulznej odozvy. Blokovú schému môžeme vidieť na obrázku 2.6. Prenosová funkcia hrebeňového filtra má tvar

$$H(z) = \frac{z^{-k}}{1 - gz^{-k}}. \quad (2.3)$$

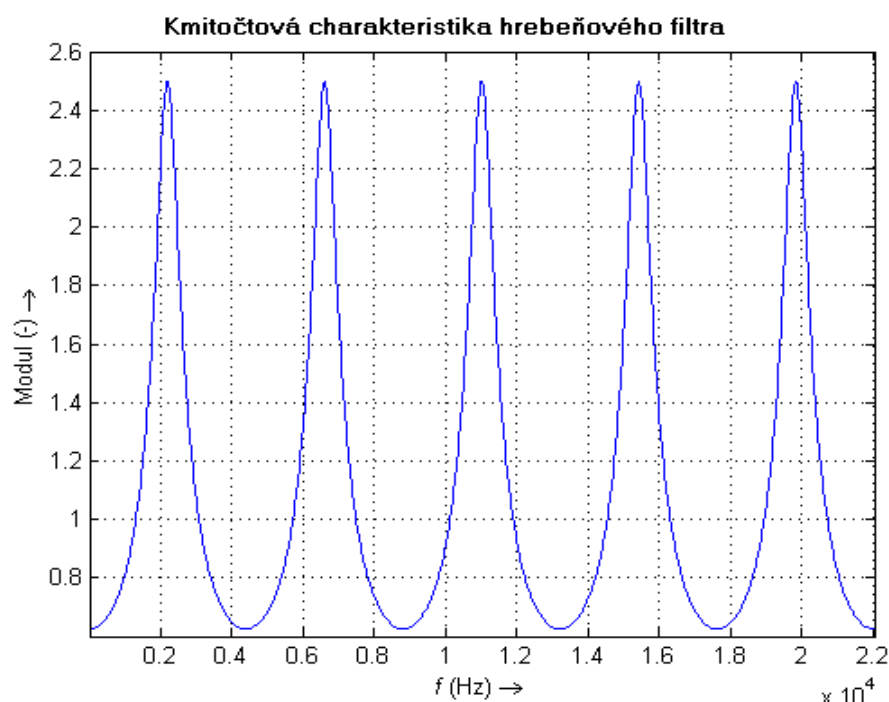


Obr. 2.6 : Bloková schéma hrebeňového filtra.

Tento druh filtra má dva parametre a to hodnotu oneskorenia k a zosilenie g . Platí, že filter je stabilný pokiaľ je absolútna hodnota zosilenia menšia ako jedna. Oneskorenie určuje rozostup medzi jednotlivými odrazmi impulznej odozvy, ako môžeme vidieť na obrázku 2.7. Z tohto obrázku je vidieť, že hrebeňový filter má jednu z veľmi žiadaných vlastností reverberácie a to exponenciálny pokles dozvuku. Naopak nie príliš žiadaná vlastnosť je periodickosť výskytu jednotlivých odrazov a taktiež k reverberácií nevhodná modulová kmitočtová charakteristiky tohto filtra. Tá je pravidelná a striedajú sa v nej lokálne minimá a maximá vytvárajúce tvar „hrebeňa“ (viď obr. 2.8). Tieto pravidelné rezonancie sa prejavujú na zvuku nechcenou koloráciou a často i neprirodzeným šumom vytvárajúcim v spracovávanom signále metalický charakter. Počet rezonancií v kmitočtovej charakteristike je $k/2$.



Obr. 2.7: Všeobecný priebeh impulznej charakteristiky hrebeňového filtra.

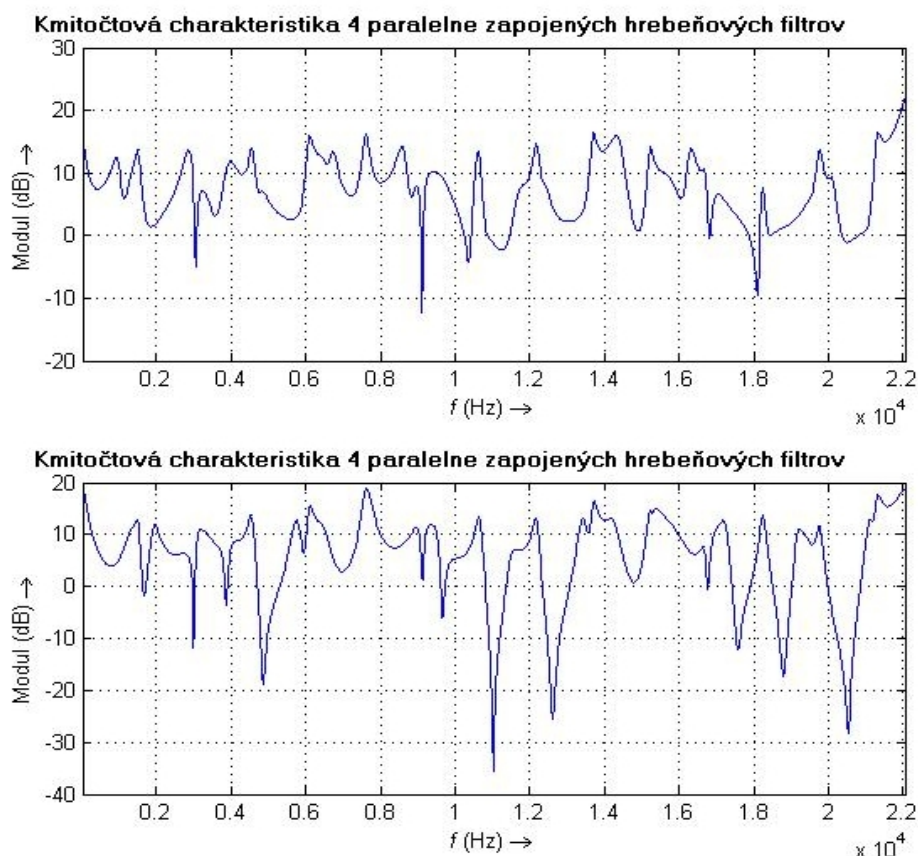


Obr. 2.8 : Kmitočtová charakteristika hrebeňového filtra s oneskorením $k=10$.

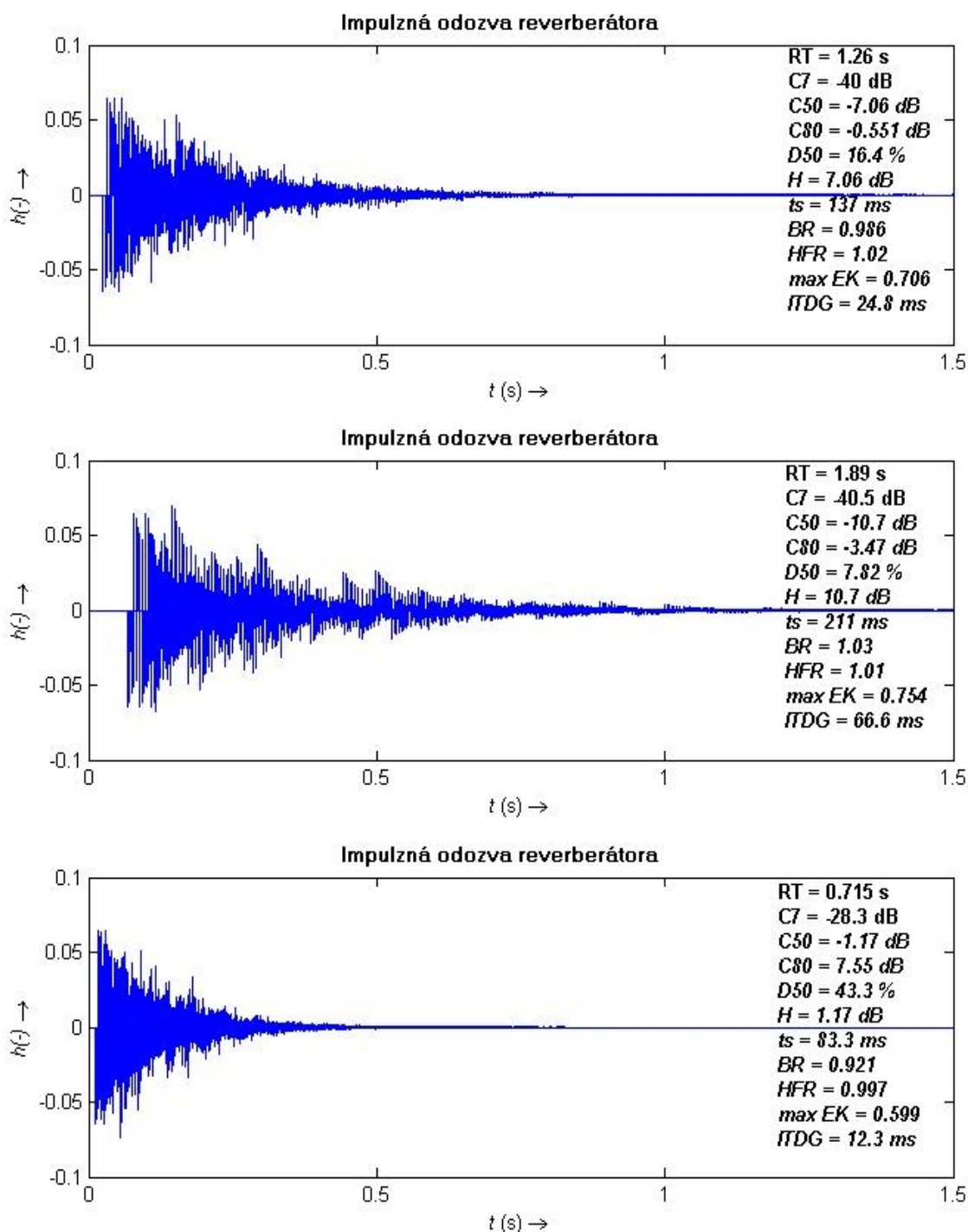
Ďalej platí, že čím viac budeme zväčšovať zosilenie, tým väčší bude rozdiel medzi minimami a maximami v kmitočtovej charakteristike, čo vyústí v intenzívnejšie rezonancie. Teoretickým riešením ako zmierniť tento problém by mohlo byť zvolenie pomerne nízkej hodnoty g , týmto však nedosiahneme dostatočnej doby dozvuku. V praxi sa na zmiernenie tohto javu používa zapojenie viacerých hrebeňových filtrov paralelne. Dôjde tak k určitej náhodnosti rozloženia rezonancií, rovnako ako k zmenšeniu ich rozsahu, čo vedie k značnému zmierneniu metalického charakteru reverberácie. Poloha mínim a maxim v kmitočtovej charakteristike sa vymení, v prípade, že bude zosilenie negatívne. Pri paralelnej kombinácii filtrov i malá zmena parametrov môže viesť k veľkej zmene v kmitočtovej charakteristike, a preto je často ťažké nájsť kombináciu parametrov ktorá by podávala uspokojivé výsledky (obr. 2.9). Podobne ako každý filter popisovaný v tejto kapitole, aj hrebeňový filter má jednotlivé špičky v impulznej odozve rozmiestnené periodicky, čo nie je úplne vhodné. V realite sa hustota odrazov pri reverberácii s časom totižto zvyšuje, čo u hrebeňového filtra neplatí. Fázová charakteristika hrebeňového filtra sa podobne ako u oneskorenia blíži k $k \cdot 180^\circ$ na $Fvz/2$, no narozdiel od oneskorenia je mierne zvlnená.

V reverberátoroch sa používajú takmer výlučne paralelné zapojenia hrebeňových filtrov. Sériové zapojenia by síce viedli k zahusteniu impulznej odozvy, no v modulovej kmitočtovej charakteristike by vznikli ešte väčšie špičky, čo je pre uspokojivú reverberáciu neprijateľné. Paralelná kombinácia tento neduh zmierňuje, pričom takisto

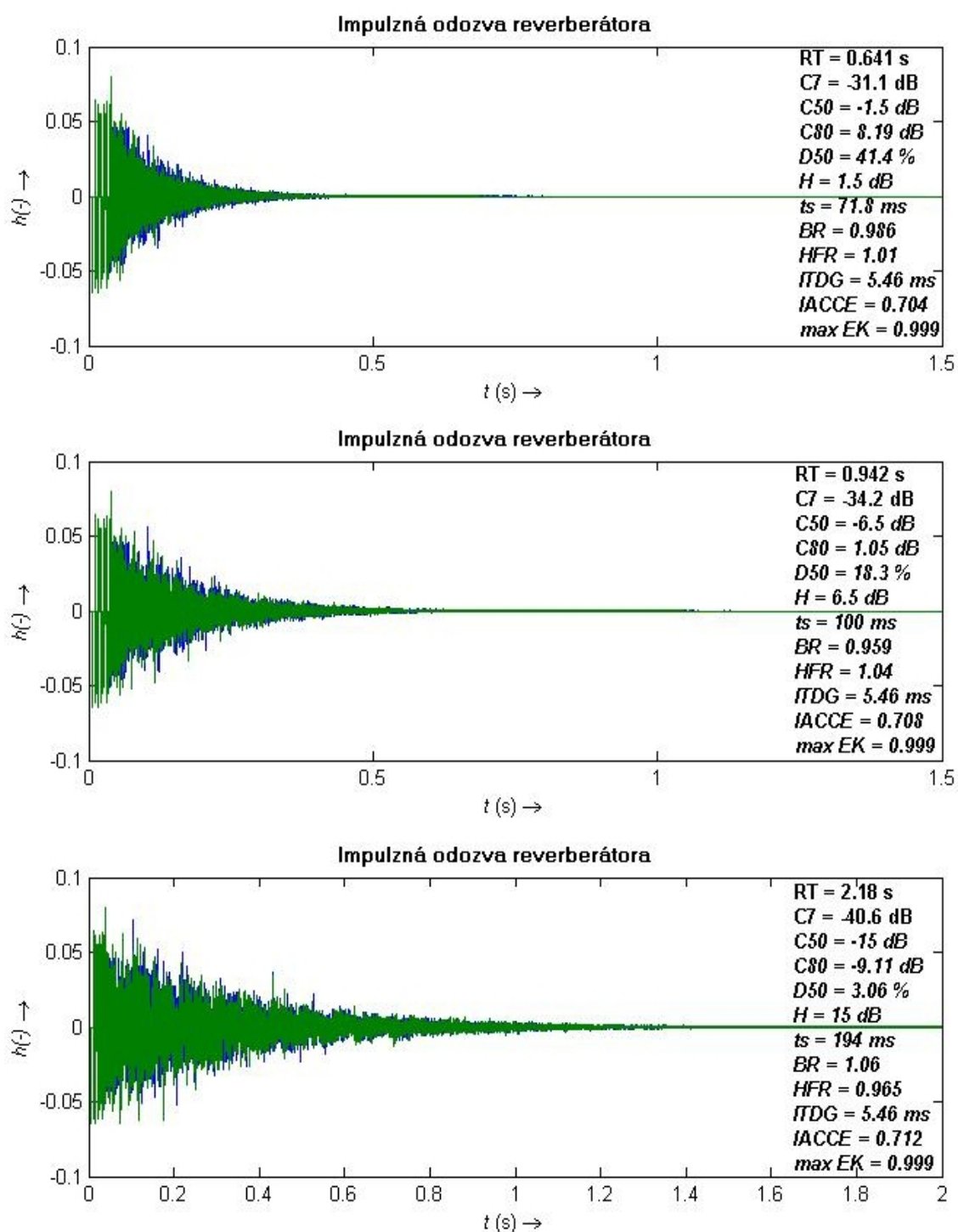
zahusťuje impulznú odozvu - tá bude zložená z príspevkov impulzných odoziev jednotlivých filtrov. Preto je dôležité, aby boli jednotlivé oneskorenia volené ako prvočísla, inak by mohlo dôjsť k sčítaniu jednotlivých špičiek impulznej odozvy, čo by viedlo nielen k jej menšej hustote, ale takisto by to mohlo viesť k vysokým osamoteným špičkám v dobe difúzneho dozvuku, čo môže pri simulácii priestoru spôsobovať neprírodný dojem. Pri nastavovaní oneskorení platí, že čím dlhšie oneskorenia nastavíme, tým bude dlhšia doba dozvuku, ale takisto bude impulzná odozva redšia. To je možné vyriešiť pridaním ďalších paralelných filtrov, čo ovšem nemusí vždy priniesť požadované výsledky. Podobne ako u iných prvkov platí, že ich nastavovanie nie je vôbec triviálna záležitosť, a často sa zmena jedného parametru môže prejaviť veľmi výrazne. To je jeden z dôvodov, prečo je často implementácia samotných algoritmov reverberátorov časovo oveľa menej náročnou činnosťou, ako samotné vytváranie jednotlivých druhov reverberácie. Na obrázku 2.10 môžeme vidieť ako sa zmena oneskorení prejaví na niektorých vybraných objektívnych parametroch akustického priestoru, na ukážke jedného z reverberátorov implementovaného v tejto práci.



Obr. 2.9: Hore je zobrazená kmitočtová charakteristika paralelnej kombinácie 4 hrebeňových filtrov. Dole je tá istá kombinácia, v ktorej bolo zmenené znamienko u jedného zosilenia.



Obr. 2.10: Tri impulzné odozvy ľavého kanálu vyprodukované reverberátorom navrhnutým Rafiim a Pardom v [23]. Navrchu sú oneskorenia hrebeňových filtrov nastavené tak ako v implementovanom algoritme. V strede je hodnota oneskorenia 1,5 krát väčšia, a naspodu je hodnota oneskorenia hrebeňových filtrov polovičná. Na parametroch vpravo môžeme vidieť, že hodnota oneskorenia týchto filtrov ovplyvní vo väčšej alebo menšej miere všetky parametre, a tak je nastavenie správnych hodnôt kľúčové pre celú reverberáciu.



Obr. 2.11: Na reverberátore vyššie sa zosilenie paralelne zapojených filtrov ovláda zosilením prvého filtra podľa doby dozvuku a vzťahu 3.6. Navrchu vidíme nastavenie so zosilením prvého filtra $g = 0,25$. Vstrede sa zosilenie $g = 0,5$ a naspođu sa $g = 0,75$. Je vidieť, že samotné nastavenie zosilenia sa podobne ako nastavenie oneskorenia prejaví na celej štruktúre, pričom platí, čím väčšie zosilenie, tým dlhšia doba dozvuku. To sa prejaví i na ostatných parametroch, ako môžeme vidieť na obrázku.

2.4 Dolná priepustnosť

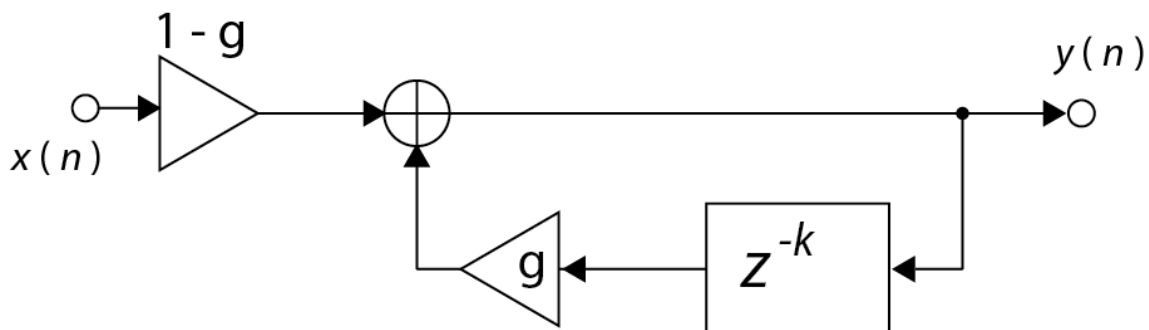
Jedným zo zásadných problémov pri reverberácii je, že väčšina štruktúr popísaných vyššie nemá kmitočtovú charakteristiku ktorá by odpovedala reálnemu šíreniu zvuku v priestore. Utlmovanie vyšších frekvencií sa preto rieši zaradením filtra typu dolná priepustnosť, ktorý má za následok zmiernenie až odstránenie metalického charakteru zvuku a frekvenčne závislé utlmenie odpovedajúce reálnemu šíreniu zvuku. K tomuto filtrovaniu slúži dolná priepustnosť, ktorej bloková schéma je na obr. 2.12. Prenosová funkcia dolnej priepustnosti má tvar

$$H(z) = \frac{1-g}{1-gz^{-1}}. \quad (2.4)$$

Na filtri typu dolná priepustnosť je kľúčové nastavenie medzného kmitočtu, ktorý určuje od ktorej frekvencie budú vyššie frekvencie utlmované. K nastaveniu tohto kmitočtu sa používa zesilenie, pričom sa používa vzťah

$$g_c = 2 - \cos\left(2\pi \frac{f_c}{f_s}\right) - \sqrt{\left(\cos\left(2\pi \frac{f_c}{f_s}\right) - 2\right)^2 - 1}, \quad (2.5)$$

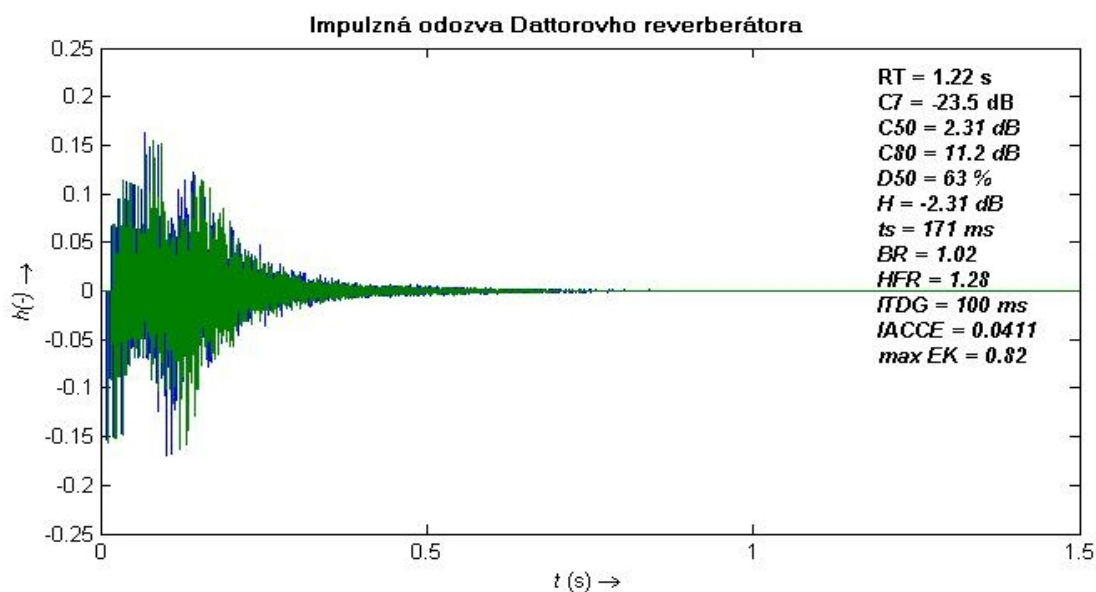
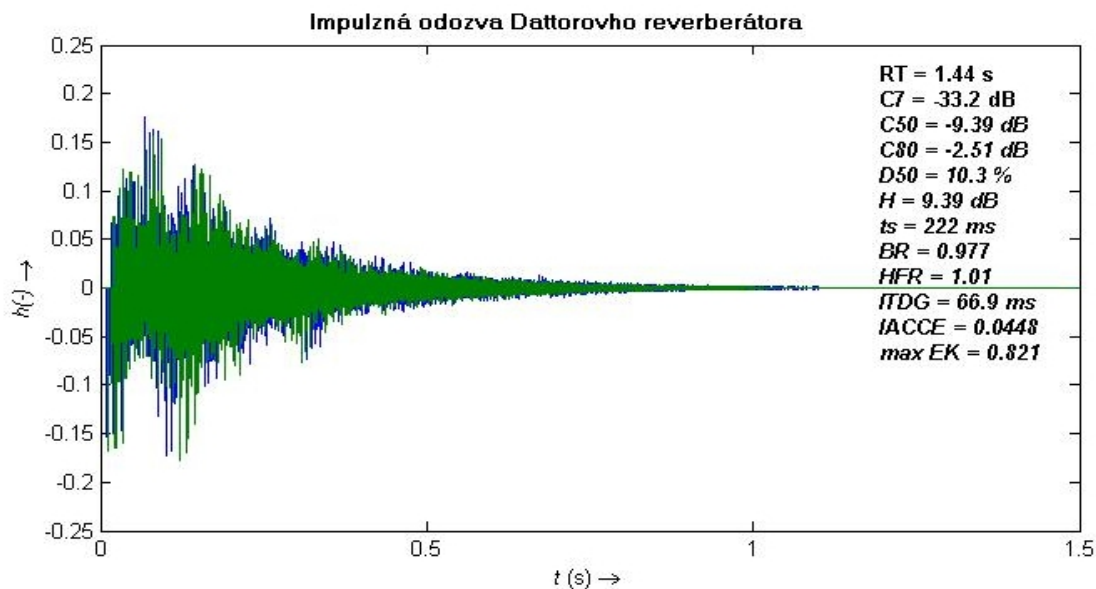
kde f_c je medzný kmitočet a f_s vzorkovací kmitočet.[23]



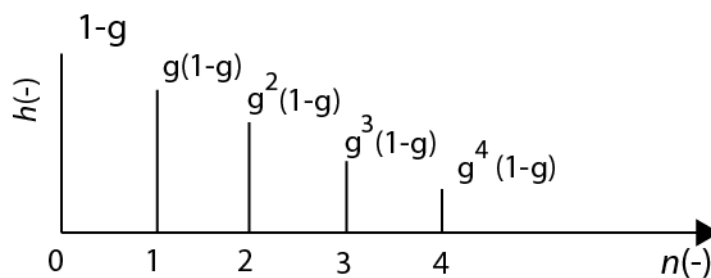
Obr. 2.12 : Bloková schéma dolnej priepustnosti.

Všeobecnú impulznú charakteristiku dolnej priepustnosti môžeme vidieť na obrázku 2.14. Rozloženie špičiek sa rádovo pohybuje v jednotkách vzorkov a impulzná odozva prudko klesá s každým ďalším vzorkom. V reverberátore sa tak dolná priepustnosť takmer vôbec neprejaví z hľadiska zvýšenia hustoty. Naopak, celková energia impulznej odozvy sa po filtrácii dolnou priepustnosťou zmenší, v závislosti na nastavenom medznom kmitočte, pričom platí, že čím je menší medzný kmitočet, tým bude energia celkovej impulznej odozvy menšia. Dolná priepustnosť sa používa predovšetkým v štruktúrach tvoriacich difúzny dozvuk. Na obrázku 2.13 môžeme vidieť impulznú odozvu Dattorrovhovho reverberátora implementovaného v tejto práci s rôznymi

hodnotami medzného kmitočtu u dolných priepustností v štruktúre tanku generujúcej mnohonásobné odrazy. Dolná priepustnosť sa v reverberácii často používa v kombinácii s inými druhmi filtrov, a to predovšetkým s hrebeňovým filtrom, kde je zaradená v spätnej väzbe. Takýto druh zapojenia používa napríklad Moorero reverberátor.



Obr. 2.13: Vyššie je impulzná odozva Dattorovho reverberátora s dolnými priepustnosťami nastavenými na medzný kmitočet rovný polovici vzorkovacieho, tzn. že vôbec nefiltrujú. Nižšie je ich medzný kmitočet nastavený zhruba na 1 kHz. Môžeme vidieť, že nastavenie sa prejaví nielen na miere vysokých a hlbokých tónov HFR a BR, ale takisto aj na iných parametroch, predovšetkým na dobe dozvuku a tým pádom aj na ostatných parametroch.

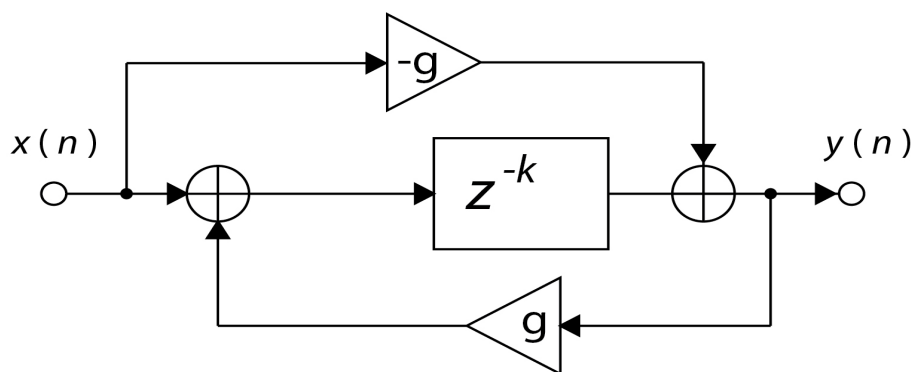


Obr. 2.14: Impulzná odozva dolnej priepustnosti.

2.5 Fázovací článok

Fázovací článok je v reverberátoroch jedným z najpoužívanějších filtrov. Jeho nesporná výhoda tkvie predovšetkým v jeho konštantnej modulovej kmitočtovej charakteristike (obr. 2.16). Jeho impulzná odozva je exponenciálne klesajúca ako môžeme vidieť na obrázku 2.19. To z neho robí jednu z ideálnych štruktúr na simuláciu reverberácie. Blokovú schému fázovacieho článku môžeme vidieť na obr. 2.15. Jeho prenosová funkcia má tvar

$$H(z) = \frac{-g + z^{-k}}{1 - gz^{-k}}. \quad (2.6)$$



Obr. 2.15: Bloková schéma fázovacieho článku.

Aby bol fázovací článok stabilný, musí byť absolútna hodnota g menšia ako 1. Z prenosovej funkcie a impulznej odozvy môžeme vidieť, že fázovací článok je štruktúra pomerne podobná hrebeňovému filteru. Vplyv zosilnenia g na výslednú impulznú odozvu je však u fázovacieho článku väčší. To je jeden z dôvodov prečo je u fázovacieho článku narozdiel od hrebeňového filteru ťažšie dosiahnuť dlhšiu impulznú odozvu. Hodnota zosilnenia je kompromisom medzi veľkosťou špičiek impulznej odozvy. Najčastejšie volia hodnoty medzi 0,5 a 1 pričom platí, že čím väčšia hodnota

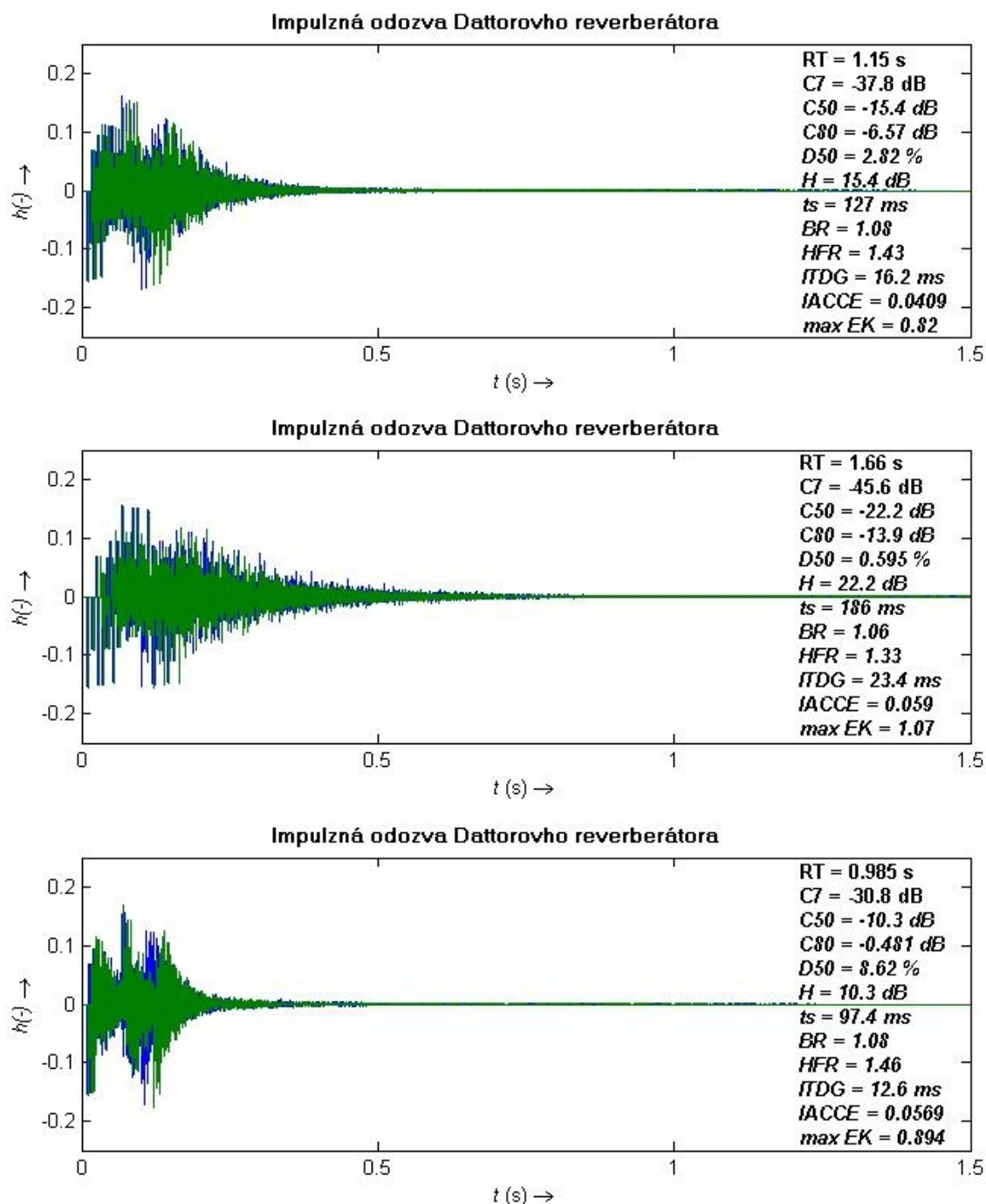
medzi 0,5 a zhruba 0,95 tým je dlhšia impulzná odozva, ale menšia výška impulzov. Pri hodnotách väčších ako 0,95 klesá už aj samotná dĺžka impulznej odozvy, takto vysoké hodnoty sa však už nepoužívajú. Kmitočtová charakteristika tohto filtra samozrejme neodpovedá reálnej reverberácii, a tak sa často používa zapojenie spolu s dolnou priepustnosťou simulujúcou absorpciu vyšších frekvencií.



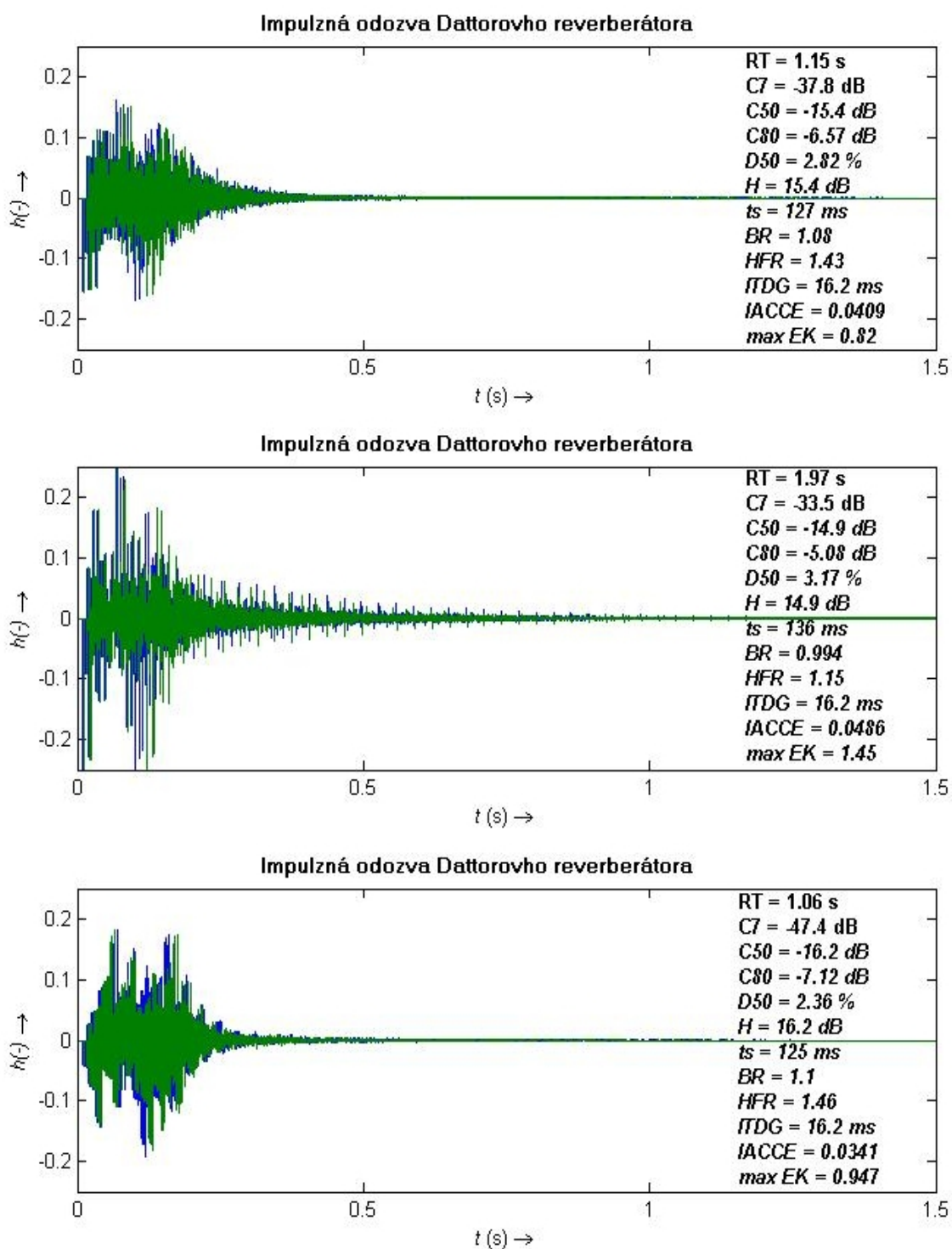
Obr. 2.16: Modulová kmitočtová charakteristika fázovacieho článku.

Hustota impulznej odozvy samotného fázovacieho článku nie je dostatočná. Preto sa používa zapojenie dvoch a viacerých fázovacích článkov. Narozdiel od hrebeňového filtra sa fázovacie články zapájajú takmer výhradne iba sériovo. Obrovskou výhodou takéhoto zapojenia je zahustenie impulznej odozvy pri zachovaní konštantnej kmitočtovej charakteristiky. Pri zapojení ľubovoľného množstva fázovacích článkov do série, kmitočtová charakteristika ostáva rovnaká ako pri jednom fázovacom článku, no hustota odrazov sa zvyšuje. Aby bolo pri tomto zapojení dosiahnutý žiadany efekt pre reverberáciu, je dôležité zvoliť správne hodnoty zosilení i oneskorení. Toto zapojenie tak rieši mnohé problémy hrebeňových filtrov, no stále nie je ideálne. Hustota odrazov je stále konštantná a nenarastá s časom. Navyše je kvôli silnejšiemu vplyvu zosilenia na impulznú odozvu ťažšie u tohto filtra dosiahnuť dlhšej doby dozvuku. To je jeden z dôvodov, prečo sa fázovací článok často používa v sériovom zapojení so štruktúrou paralelne zapojených hrebeňových filtrov. Toto zapojenie využíva mnoho reverberátorov, napríklad i reverberátor navrhnutý Pardom a Rafiim v [23], ktorý je implementovaný v tejto práci. Paralelné zapojenie fázovacích článkov by síce viedlo k zhutneniu impulznej odozvy, ale v oveľa menšej miere. Pri sériovom zapojení sa totižto

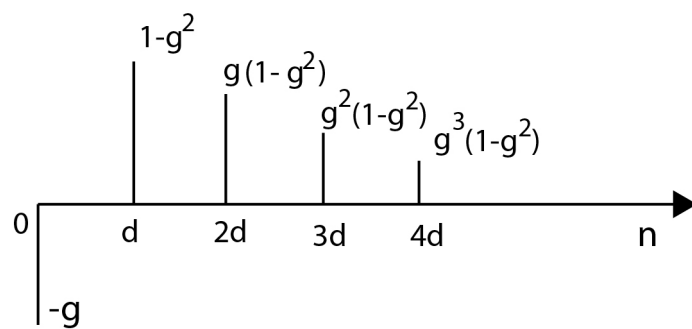
každá špička impulznej odozvy konvolúciou s ďalším fázovacím článkom premení na sériu impulzov.



Obr. 2.17: Impulzné odozvy Dattorovho reverberátora s rôznymi hodnotami oneskorenia fázovacích článkov a k nim príslušné objektívne parametre akustického priestoru. Navrchu sú hodnoty oneskorenia nastavené podľa pôvodného Dattorovho návrhu, v strede sú nastavené na dvojnásobnú hodnotu a najnižšie na polovičnú hodnotu oproti doporučovanému nastaveniu.



Obr. 2.18: Impulzné odozvy Dattorovho reverberátora s rôznymi hodnotami zosilenia fázovacích článkov a k nim príslušné objektívne parametre akustického priestoru. Navrchu sú hodnoty zosilenia nastavené podľa pôvodného Dattorovho návrhu, v strede sú nastavené na hodnotu vyššiu o 0,2 a najnižšie na hodnotu zhruba o 0,2 nižšiu ako je odporúčané v pôvodnom návrhu.



Obr. 2.19: Všeobecná impulzná odozva fázovacieho článku.

3 Implementácia reverberátorov

V práci boli celkovo implementované štyri reverberátory. K samotným reverberátorom bol navyše implementovaný i skript, ktorý počíta jednotlivé objektívne parametre akustického priestoru z impulznej odozvy. Ku každému z implementovaných reverberátorov bol pridaný parameter balancujúci pomer medzi originálnym a reverbovaným signálom. Rafiho reverberátor je iba označením pre reverberátor navrhnutý Zafarom Rafiim a Bryanom Pardom v [23]. Keďže tento reverberátor nemá žiadny názov, pre potreby tejto práce som ho nazval Rafiho reverberátorom. To isté platí aj pre reverberátor navrhnutý Väänänenovou v [29]. Všetky reverberátory sú implementované ako funkcie prípadne funkcie s grafickým rozhraním. Na implementáciu bol použitý Matlab vo verzii 7.7.0.471.

3.1 Jotov Reverberátor

Jotov reverberátor je postavený na princípe spätnoväzbovej oneskorovacej siete (ďalej už len FDN). Tá bola ako prvá spomenutá Michaelom Gerzonom na začiatku 70. rokov, no ostala prehliadnutá a do pozornosti sa dostala až pri publikovaní práce Johna Stautnera a Millera Pucketteho začiatkom 80. rokov [28]. Ide o generalizovaný model paralelného zapojenia akýchkoľvek štruktúr založených na oneskorení a spätnej väzbe. Sieť na obrázku 3.1 je generalizáciou paralelného zapojenia hrebeňových filtrov v prípade, že ako váhová matica bude použitá diagonálna jednotková matica, pričom počet liniek FDN určuje počet paralelne zapojených filtrov. Rozdiel oproti paralelne zapojeným filtrom spočíva v tom, že spätná väzba v FDN sieti je realizovaná pomocou unitárnej matice, ktorá prepája každý vstup s každým výstupom. To má za následok, že výstup každej linky tejto siete ovplyvní každý vstup a tým pádom je odstránená pravidelnosť v impulznej odozve oproti obvyčajnému paralelnému zapojeniu hrebeňových filtrov. Toto je v reverberácii veľmi žiadaná vlastnosť nakoľko charakter reverberácie je značne náhodný, a to je jeden z dôvodov, prečo sa v súčasnosti reverberátory postavené na tomto druhu siete stali tak populárne a často implementované. V tejto práci je implementovaný algoritmus založený na Jotovom reverberátore popísanom v [5]. Oproti Jotovmu návrhu je do celkovej štruktúry pridaný FIR filter generujúci prvotné odrazy, počet oneskorovacích liniek je zdvojnásobený na 8, čomu odpovedá aj použitie odlišnej unitárnej matice. Naopak zosilenia na vstupe a výstupe siete sú odstránené.

Sieť na Obr. 3.1 popisuje rovnica (3.1), ktorá reprezentuje generalizáciu paralelného zapojenia hrebeňových filtrov ako ich navrhol Schroeder, v prípade, že

matica oneskorení je diagonálna a má tvar

$$\mathbf{Z}^{-k} = \begin{bmatrix} z^{-k_1} & & & \\ & z^{-k_2} & & \\ & & z^{-k_3} & \\ & & & z^{-k_4} \end{bmatrix}.$$

$$\mathbf{Y}(z) = \mathbf{Z}^{-k} \mathbf{X}(z) + \mathbf{AZ}^{-k} \mathbf{Y}(z). \quad (3.1)$$

Neskôr Jot túto štruktúru rozšíril zosilneniami simulujúcimi absorpciu stien a vzduchu zaradenými za jednotlivé oneskorenia. Po tomto rozšírení dostaneme rovnicu

$$\mathbf{Y}(z) = \mathbf{gZ}^{-k} \mathbf{X}(z) + \mathbf{gAZ}^{-k} \mathbf{Y}(z), \quad (3.2)$$

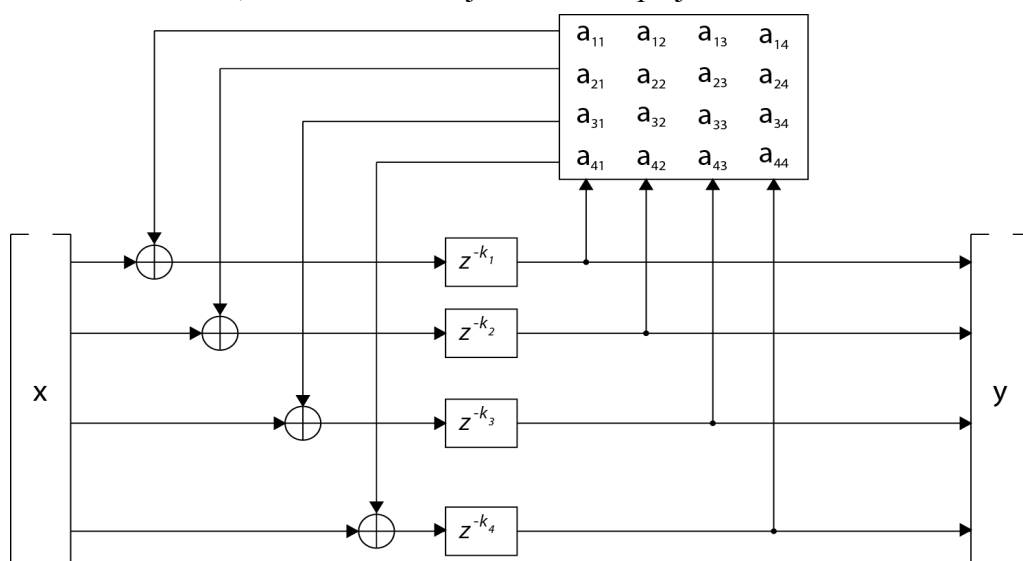
pričom

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} g_1 & & & \\ & g_2 & & \\ & & g_3 & \\ & & & g_4 \end{bmatrix}.$$

Vďaka podobnosti Schroederovho a Jotovho reverberátoru môžeme pre výpočet zosilnenia v implementovanom reverberátore použiť vzťah z [25]

$$g_i = 10^{\frac{-3 * k_i * T}{T_r}}. \quad (3.3)$$

V Jotovom algoritme sa vyskytuje aj zosilnenie v spätnej väzbe, umožňujúce ešte viac upraviť výslednú impulznú odozvu reverberátoru, no v našom prípade bude toto zosilnenie uvažované 1, čím sa v celkovej štruktúre neprejaví.

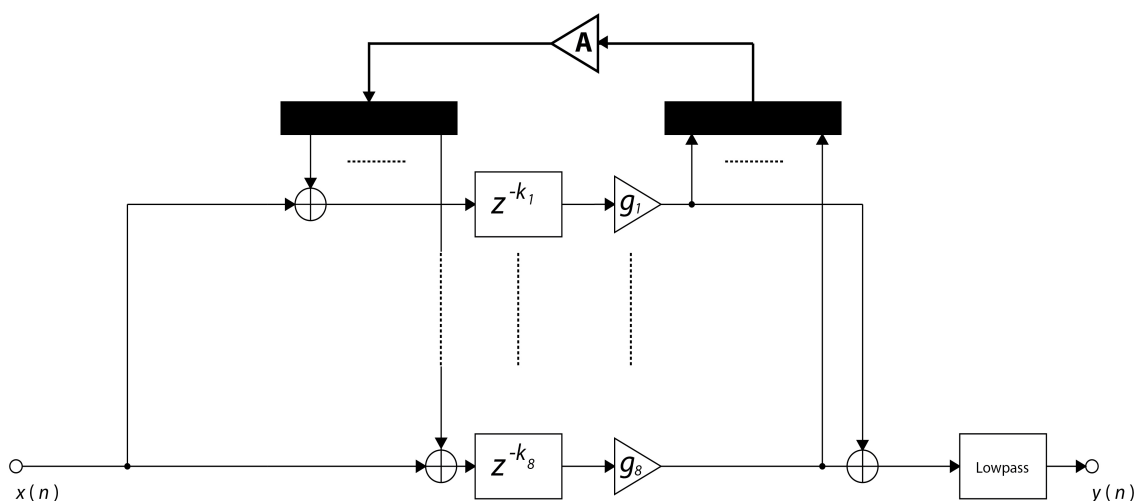


Obr. 3.1 : Spätnoväzbová oneskorovacia sieť.

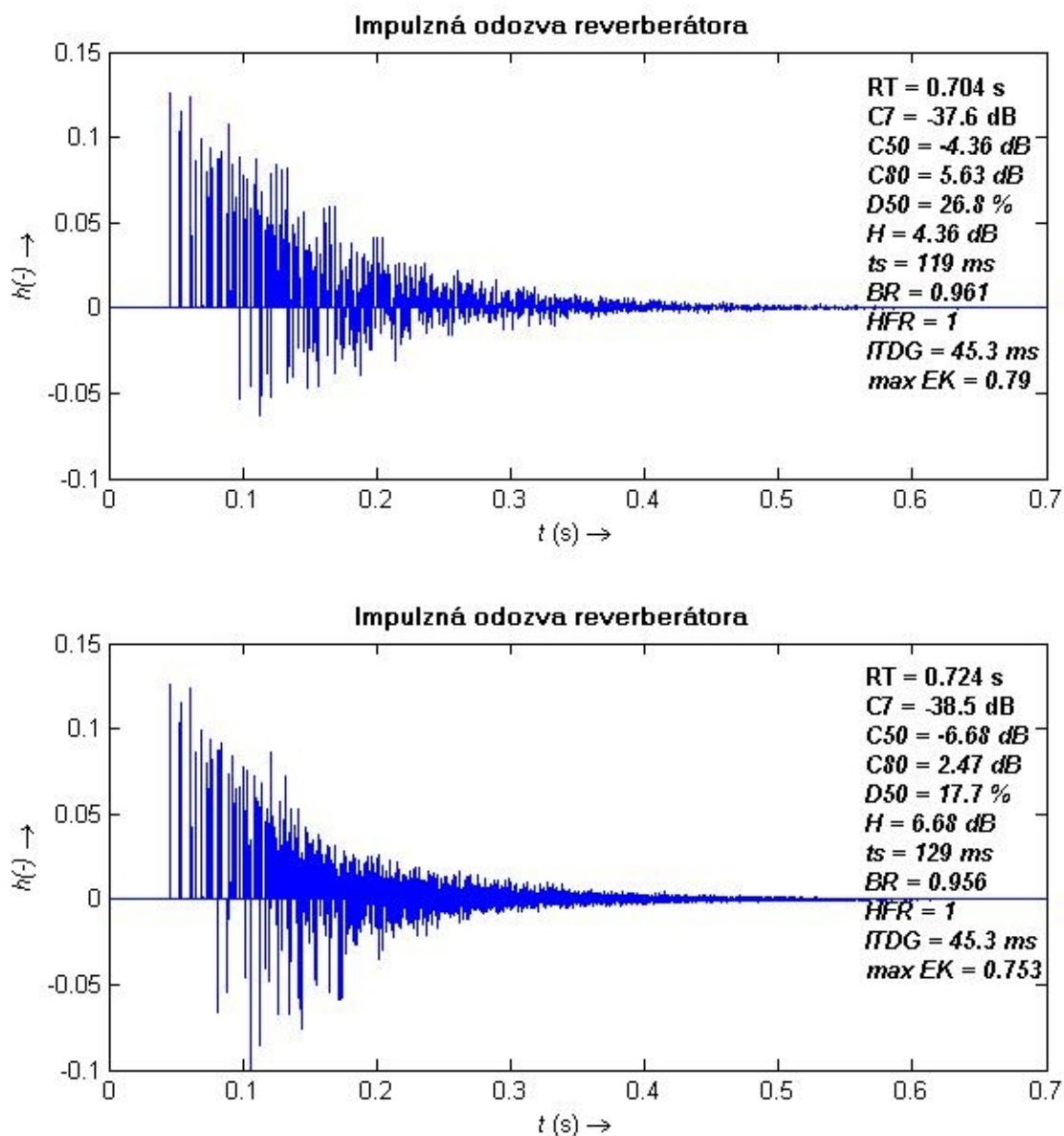
Schému implementovaného reverberátoru môžeme vidieť na obrázku 3.2. Ako už bolo spomenuté, FDN sieť v prípade, že je matica zosilení rovná diagonálnej jednotkovej matici, je generalizovaným zapojením paralelných hrebeňových filtrov. Z toho je jasné, že táto matica zohráva v FDN sieti kľúčovú úlohu. Drobný rozdiel v matici ovplyvní celú impulznú odozvu, ako môžeme vidieť na obrázku 3.3. Matica musí spĺňať určité požiadavky. V prvom rade, ide vždy o štvorcovú maticu o veľkosti 2^n kde n je ľubovoľné prirodzené číslo. Počet riadkov a stĺpcov matice je rovnaký ako počet oneskorovacích liniek. Matica musí byť unitárna (komplexné koeficienty), alebo ortogonálna (reálne koeficienty). To v sebe zahŕňa, že platí vzťah

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}' = \mathbf{I} \quad (3.4)$$

kde \mathbf{A}' je transponovaná matica \mathbf{A} a \mathbf{I} je matica identity. Nie každá takáto matica je však vhodná k použitiu v reverberátoroch. Existujú určité doporučená ako by mala matica vyzeráť, no vo všeobecnosti platí, že o vhodnosti matice na tento účel si môžeme byť istý až po empirickom overení, a to obzvlášť pri sieťach s väčším počtom oneskorovacích liniek. Platí však, že pokiaľ sú elementy na diagonále nulové, výstupy liniek nebudú ovplyvňovať svoje vlastné vstupy, naopak, elementy mimo diagonálu ovplyvňujú hodnoty na vstupe ostatných oneskorovacích liniek. Pre najväčšiu hustotu impulznej odozvy je ideálne, pokiaľ matica neobsahuje žiadne nuly. Pre stabilitu štruktúry matica nemôže obsahovať zosilenia väčšie ako jedna v absolútnej hodnote. Medzi matice ktoré vyhovujú týmto podmienkam patria napríklad hadamardovské alebo householderove matice [27]. Ďalej je možné takúto maticu získať z inej matice vyhovujúcej vzťahu 3.4 tým, že ju vynásobíme sebou samou. V Matlabe je príkaz *orth*, ktorý z ľubovoľnej matice spraví ortogonálnu maticu rovnakých rozmerov, vyhovujúcu podmienke v rovnici 3.4. Takýmto spôsobom je možné získať mnoho matíc za krátku dobu a empiricky zistiť, ktorá sa najviac hodí k danej implementácii reverberátoru.



Obr. 3.2 : Blokové schéma implementovaného UFDN reverberátoru.



Obr. 3.3: Impulzná odozva Jotovho reverberátora s dvoma rôznymi váhovacími maticami v spätnej väzbe. Druhá matica vznikla použitím príkazu *orth* na prvú maticu.

Vytvorenie reverberátora postaveného na FDN je v Matlabe pomerne výpočetne náročné. Na vytvorenie impulznej odozvy nie je možné použiť funkciu *impz* a preto je nutné vygenerovať celú impulznú odozvu pomocou použitia cyklu *for* [14]. Dôsledkom tohto je pomerne dlhý čas behu skriptu i pre menšie doby dozvuku. Jednotlivé oneskorenia boli nastavené metódou experimentálne, pričom je dôležité aby boli nastavené na hodnotu prvočísla, čím by sa malo takmer úplne zabrániť prekryvaniu jednotlivých impulzov pri súčte výslednej impulznej odozvy z jednotlivých oneskorovacích liniek. Kľúčové pre celú kvalitu získaného reverbu je použitie vhodnej

matice. V tejto práci bola použitá matica

$$A = \begin{bmatrix} b & a & a & a & a & a & a & a \\ a & a & b & a & a & a & a & a \\ a & b & a & a & a & a & a & a \\ a & a & a & a & b & a & a & a \\ a & a & a & b & a & a & a & a \\ a & a & a & a & a & a & b & a \\ a & a & a & a & a & b & a & a \\ a & a & a & a & a & a & a & b \end{bmatrix},$$

kde $a = -0.25$ a $b = 0.75$.

Princíp vytvárania spätnej väzby a jej zapisovania do impulzných odoziev jednotlivých liniek je uvedený nižšie.

```
for i=1:implength

    impzasob(:,i)=impzasob(:,i).*g;    %premenná impzasob
                                       %predstavujejednotlivé
                                       %oneskorovacie linky,g
                                       %je vektor zosilení

    imp(:,i)=impzasob(:,i);            %imp je matica
                                       %impulzných odoziev
                                       %jednotlivých liniek

    feedback=impzasob(:,i) '*A;        %spätnoväzbová slučka
                                       %váhovaná maticou A a
                                       %následne ukladaná do
                                       %jednotlivých liniek

    impzasob(1,i+oneskorenie(1))=feedback(1);
    impzasob(2,i+oneskorenie(2))=feedback(2);
    impzasob(3,i+oneskorenie(3))=feedback(3);
    impzasob(4,i+oneskorenie(4))=feedback(4);
    impzasob(5,i+oneskorenie(5))=feedback(5);
    impzasob(6,i+oneskorenie(6))=feedback(6);
    impzasob(7,i+oneskorenie(7))=feedback(7);
    impzasob(8,i+oneskorenie(8))=feedback(8);

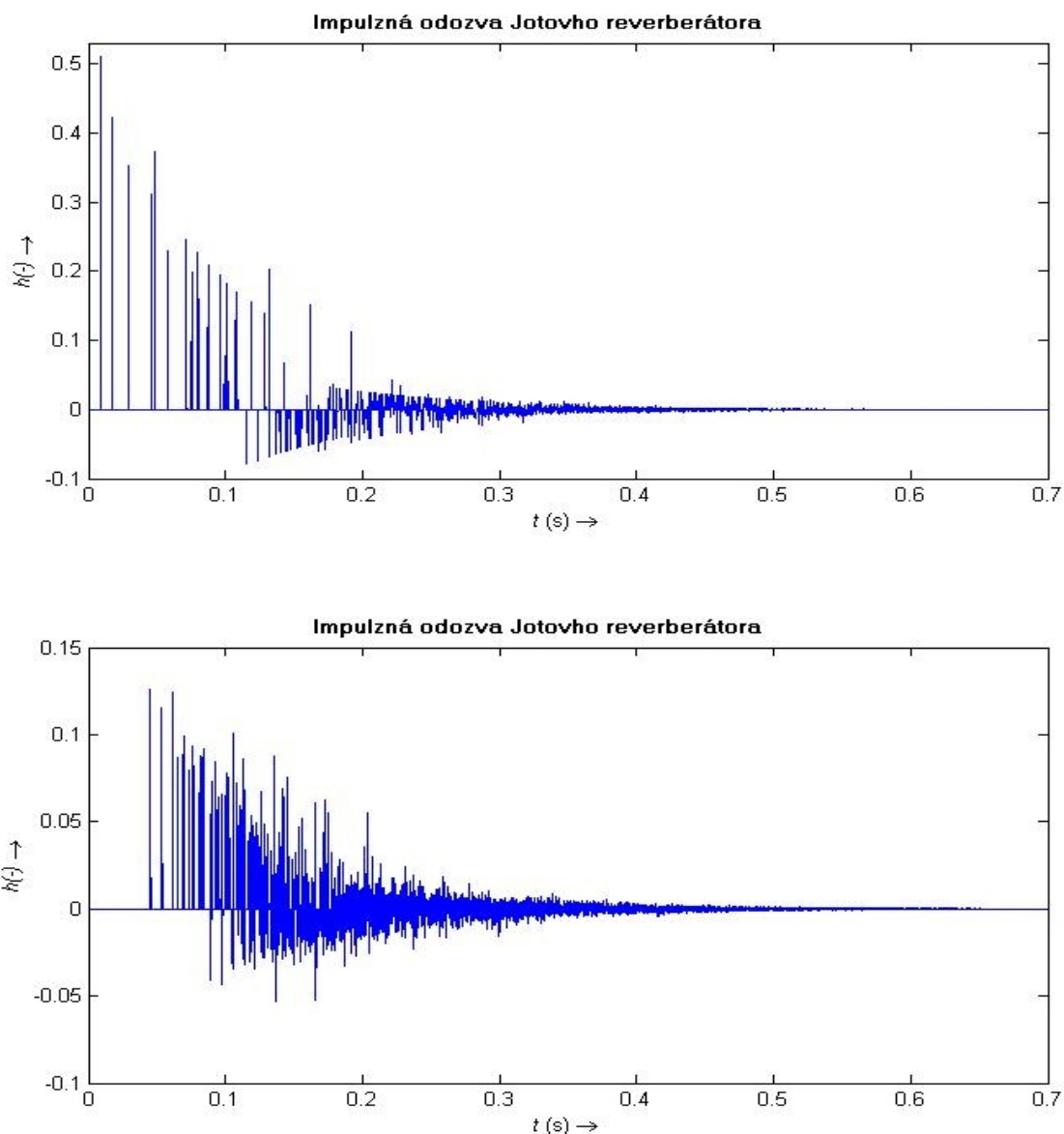
end

IR=sum(imp);                          %výsledná impulzná odozva získaná
                                       %sčítaním z jednotlivých liniek
```

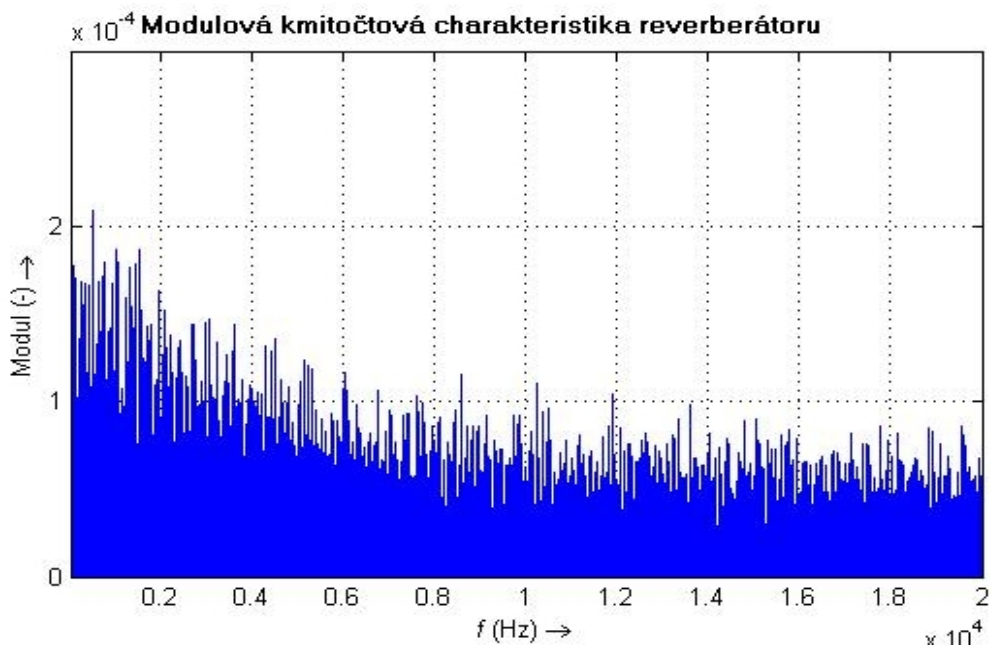
Výsledkom tohto kódu je impulzná odozva systému, ktorú ešte filtrujeme dolnou priepustnosťou, aby sa dosiahlo dôvernejšieho efektu simulácie priestoru a obmedzil sa

metalický charakter zvuku. Medzný kmitočet dolnej priepustnosti je nastavený podľa vzťahu (2.5). Výstupný signál získame konvolúciou vstupného signálu s vygenerovanou impulznou odozvou.

Existujú dva prístupy k implementácii prvotných odrazov do celkovej schémy reverberátora sériovo alebo paralelne. Obe zapojenia majú svoje výhody a nevýhody, ktoré boli popísané v kapitole 2. Výsledný signál je pri oboch druhoch zapojenia značne odlišný, v dôsledku značne rozdielnej impulznej odozvy (Obr. 3.4).



Obr. 3.4: Výsledná impulzná odozva Jotovho reverberátora s paralelne (navrchu) a so sériovo zapojeným FIR filtrom (dole).



Obr. 3.5 : Modulová kmitočtová charakteristika implementovaného reverberátoru. Jej klesajúci charakter je dôsledkom dolnej priepustnosti.

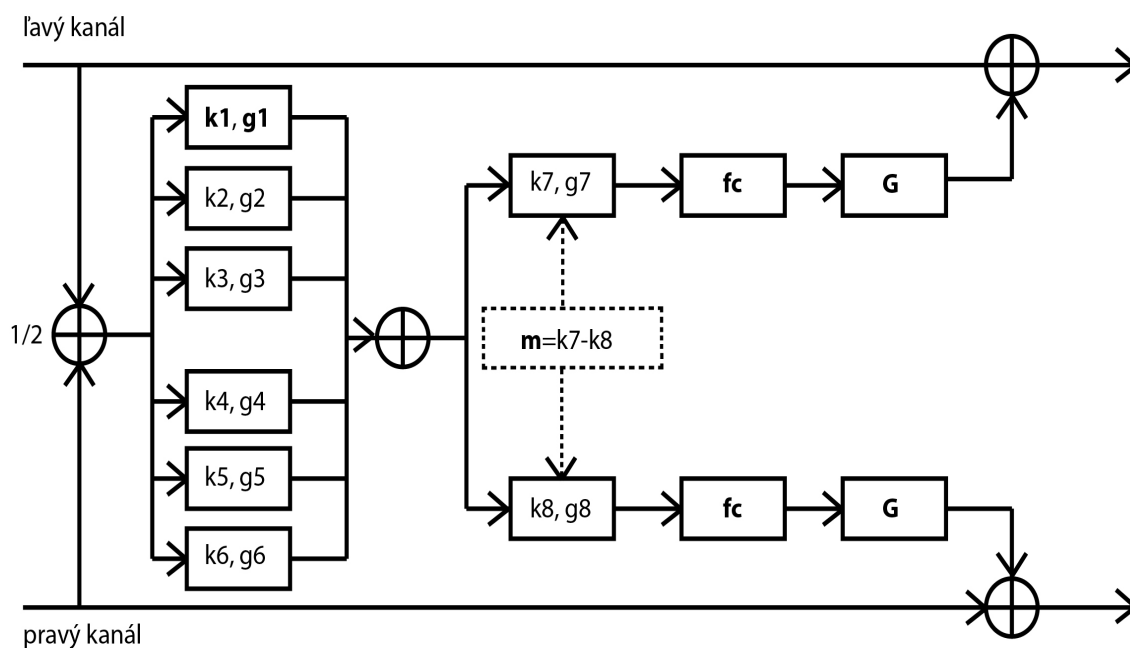
Jotov reverberátor implementovaný v tejto práci má FIR filter zapojený sériovo k modulu neskorej reverberácie, nakoľko hustota odrazov v impulznej odozve bola pri tomto zapojení väčšia, a subjektívny dojem zo zvuku bol porovnateľný s paralelným zapojením. Takisto z hľadiska objektívnych parametrov dosahovalo toto zapojenie porovnateľné výsledky ako môžeme vidieť na obrázku 2.4 v druhej kapitole pri popise FIR filtru.

3.2 Rafiiho reverberátor

Ďalším implementovaným algoritmom je reverberátor od Rafiiho a Parda popísaný v [23]. Ide o reverberátor, ktorý je možné ovládať pomocou piatich parametrov pomocou ktorých môžeme pomerne jednoducho meniť výsledný zvuk spracovávaného signálu. V prípade potreby presnejšej aproximácie priestoru je možné meniť parametre každej štruktúry zvlášť, no päť základných parametrov poskytuje dostatočnú flexibilitu na základné zmeny impulznej odozvy. Tento algoritmus je inšpirovaný Moorerovým reverberátorom, ktorý je popísaný v [22]. Pozostáva z šiestich paralelne zapojených hrebeňových filtrov nasledovaných fázovacím článkom, dolnou priepustnosťou a zosilením určujúcim intenzitu reverbovaného signálu v celkovom výstupnom signále. Prvá fáza reverberácie pozostávajúca z hrebeňových filtrov je spoločná pre oba kanály. Po filtrácii signálu hrebeňovými filterami sa signál rozdelí do dvoch separátnych vetiev odpovedajúcich ľavému a pravému kanálu stereo signálu. Výsledný signál je

kombináciou pôvodného a filtrovaného signálu v oboch kanáloch. Celková schéma zapojenia bloku difúzneho dozvuku reverberátoru je zobrazené na obrázku 3.6. Reverberátor je primárne určený na vytváranie mnohonásobných odrazov. V prípade implementácie v tejto práci je pred modul neskorej reverberácie zaradený i FIR filter, a to sériovo.

Vstup reverberátoru tvorí mono signál pozostávajúci zo sumy ľavého a pravého kanálu vstupného signálu o polovičnej intenzite. Ten je následne filtrovaný bankou šiestich paralelne zapojených hrebeňových filtrov. Každý hrebeňový filter má 2 parametre – oneskorenie a zosilenie. Podľa Moorera by jednotlivé oneskorenia mali byť nastavené v pomere 1:1.5, pričom prvé oneskorenie d_1 by malo mať najväčšiu hodnotu [22]. Oneskorenia ostatných filtrov tak možno jednoducho vypočítať podľa nastavenia oneskorenia prvého filtra, ideálne pomocou násobenia konštantou menšou ako jedna. Nevýhodou hrebeňových filtrov je ich modulová kmitočtová charakteristika, ako bolo popísané v kapitole 2. Tento nedostatok však možno zmierniť pomocou nastavenia RT_{60} na rovnakú hodnotu pre všetky paralelne zapojené hrebeňové filtre. To sa dá dosiahnuť pomocou vhodného nastavenia zosilení a oneskorení jednotlivých hrebeňových filtrov.



Obr. 3.6: Bloková schéma reverberátoru č.2. Oneskorenia $k1$ až $k6$ a zosilenia $g1$ až $g6$ reprezentujú hrebeňové filtre, $k7$ a $k8$, respektíve $g7$ a $g8$ sú fázovacie články, fc označuje medzný kmitočet dolnej priepustnosti a G je zosilenie balancujúce pomer medzi efektovaným a originálnym signálom. Parameter m predstavuje rozdiel medzi oneskoreniami fázovacích článkov. Štruktúra je navrhnutá tak, aby sa dala pohodlne ovládať pomocou piatich parametrov, ktoré sú na obrázku vyznačené tučným písmom.

Dobu dozvuku hrebeňového filtru určíme podľa vzťahu uvedeného nižšie

$$T_{60k} = k_i \frac{\log 10^{-3}}{\log g_i}. \quad (3.5)$$

Pomocou zosilenia a oneskorenia prvého hrebeňového filtru určíme dobu dozvuku a dopočítame zosilenia ostatných filtrov pomocou vzťahu 3.6. Zosilenie prvého hrebeňového filtra bude najmenšie, narozdiel od jeho oneskorenia.

$$g_i = 10^{k_i \log(10^{-3}) / T_{60}}. \quad (3.6)$$

Pomocou vzťahov 3.5, 3.6 a rozloženia oneskorení v pomere navrhnutom Moorerom pomocou násobenia konštantou sa celkový počet parametrov potrebných k ovládaniu bloku hrebeňových filtrov zníži z dvanásť na dva parametre – tými sú zosilenie a oneskorenie prvého filtru. Moorer navrhuje, aby boli oneskorenia filtrov nastavené v hodnotách medzi 10 a 100 ms, pričom treba dbať na to, aby boli nastavené hodnoty vzorkov na prvočísla, čím sa zminimalizuje prekrývanie jednotlivých odrazov. Najmenšie oneskorenie d_6 určuje, kde sa objaví prvá špička impulznej odozvy.

Po filtrácii signálu cez hrebeňové filtre je signál rozdelený na dva identické signály, ktoré sú ďalej spracovávané zvlášť. Účelom tohto rozdeleného spracovania je vznik drobných zmien medzi ľavým a pravým kanálom stereo signálu, čo vedie k realistickejšiemu dojmu reverberácie. Každá vetva pozostáva z fázovacieho článku, dolnej priepustnosti a zosilenia ovládajúceho pomer originálneho a filtrovaného signálu. Podľa Moorera je základné oneskorenie oboch fázovacích článkov d_a rovné 6 ms. Medzi jednotlivými oneskoreniami fázovacích článkov je zavedený rozdiel m , ktorý môže nadobúdať hodnoty medzi 0 až 12 ms, nepočítajúc krajné hodnoty. Oneskorenia jednotlivých fázovacích článkov sú potom nastavené podľa vzťahov 3.7, respektíve 3.8. Zosilenia oboch fázovacích článkov sú nastavené na rovnakú hodnotu, ktorá je pre implementovaný reverberátor stanovená ako $g_7 = g_8 = \frac{1}{\sqrt{(2)}}$. Celkový počet parametrov potrebných k ovládaniu oboch fázovacích článkov je jedna. Ovládame iba oneskorenie oboch článkov pomocou parametru m . Pri realizácii reverberátoru sa ukázalo, že oneskorenie $d_a = 6\text{ms}$ je navrhnuté tak, aby vyhovovalo skôr krátkej reverberácii, takže vo výslednom reverberátore bolo použité oneskorenie väčšie, ktoré podávalo lepšie výsledky pri viacerých nastaveniach ostatných parametrov.

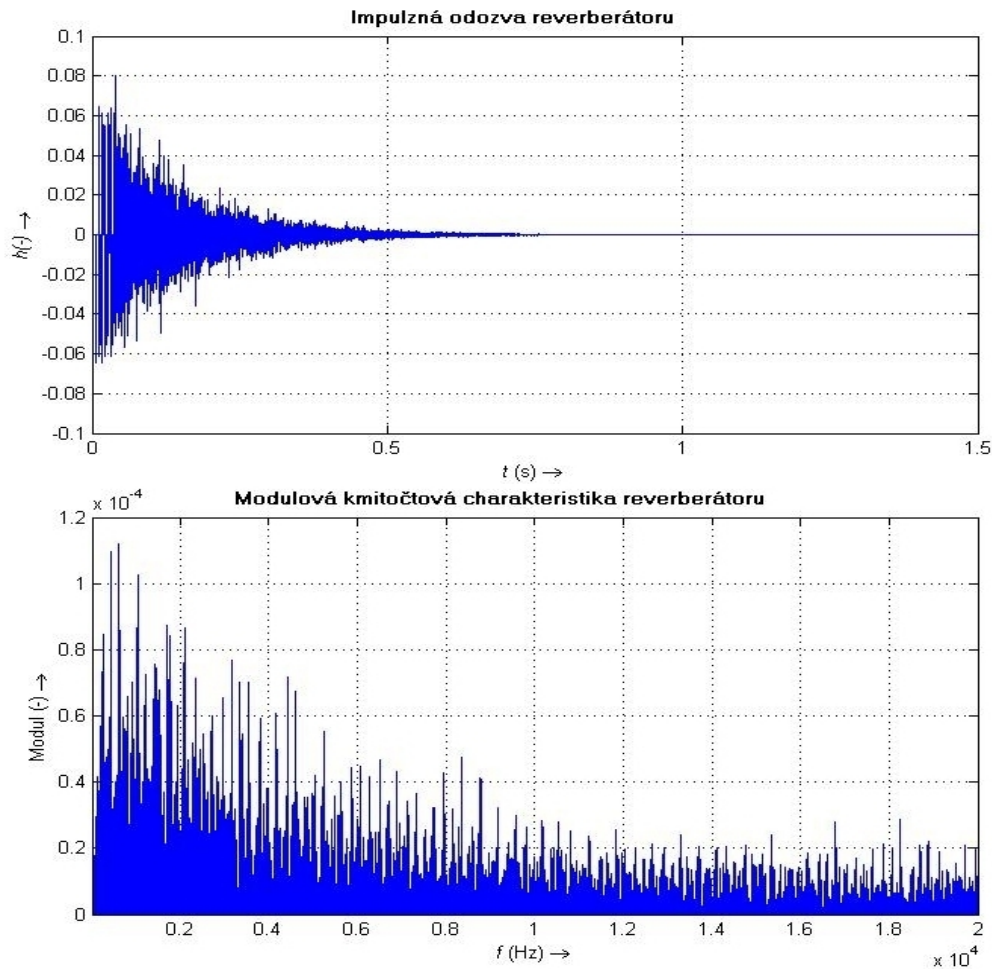
$$k_7 = d_a + \frac{m}{2}, \quad k_8 = d_a - \frac{m}{2}. \quad (3.7, 3.8)$$

Ďalší filter, ktorý má za úlohu simulovať utlmenie vyšších frekvencií prítomé v reálnom priestore, je dolná priepustnosť. Jediný parameter, ktorý riadi dolnú priepustnosť v oboch kanáloch reverberátoru je medzný kmitočet, ktorý určuje

priepustné pásmo filtra. Z medzného kmitočtu jednoducho určíme zosilenie filtra podľa vzťahu nižšie.

$$g_c = 2 - \cos\left(2\pi \frac{f_c}{f_s}\right) - \sqrt{\left(\cos\left(2\pi \frac{f_c}{f_s}\right) - 2\right)^2 - 1}. \quad (3.9)$$

kde f_c je medzný kmitočet dolnej priepustnosti, f_s je vzorkovací kmitočet a g_c je zosilenie dolnej priepustnosti. Medzný kmitočet je rovnaký v oboch vetvách reverberátoru. Za dolnou priepustnosťou nasleduje už len zosilenie G , ktoré určuje pomer medzi originálnym a filtrovaným signálom, a naberá hodnoty medzi 0 a 1, kde nula zodpovedá pôvodnému nefiltrovanému signálu a 1 odpovedá iba filtrovanému signálu. Celkovo je tak na ovládanie reverberátoru potrebných iba päť parametrov: oneskorenie a zosilenie prvého hrebeňového filtra, rozdiel medzi oneskoreniami fázovacích článkov, medzný kmitočet dolnej priepustnosti a zosilenie G . Hodnoty ostatným parametrov je možné pomocou vzťahov vyššie z týchto piatich základných jednoducho odvodiť. Výsledná impulzná odozva reverberátoru je zobrazená nižšie.



Obr. 3.7: Impulzná odozva ľavého kanálu Rafiho reverberátoru a jeho modulová kmitočtová charakteristika.

Výstupom reverberátoru je vždy stereo signál, rovnako ako je stereo i impulzná odozva. Na obrázku je 3.7 je zobrazený iba ľavý kanál kvôli väčšej prehľadnosti. Vlastnosti reverberátoru sú debatované v poslednej časti tejto kapitoly.

3.3 Dattorrov reverberátor

Ďalší implementovaný reverberátor je postavený predovšetkým na fázovacích článkoch a jeho topológiu navrhol Dattorro v [9]. Charakter reverberácie je podobne ako u predošlého reverberátoru ovplyvňovaný pomocou zopár navrhnutých parametrov. Štruktúra pozostáva z dvoch hlavných častí: dekorelačnej časti obsahujúcej dolnú priepustnosť a štyri sériovo zapojené fázovacie články. Druhá časť štruktúry je takzvaný tank v ktorom signál cirkuluje a vytvára sa v ňom difúzny dozvuk. Štruktúru reverberátoru môžeme vidieť na obrázku 3.8 Treba podotknúť, že tento reverberátor je určený na vytváranie difúzneho dozvuku a nerieši prvú fázu reverberácie v podobe prvotných odrazov. Ako v jedinom z reverberátorov v tejto práci nie je v tomto algoritme využitý FIR filter na modelovanie prvotných odrazov a zahustenie impulznej odozvy, ktorá je dostatočne hustá už bez jeho použitia.

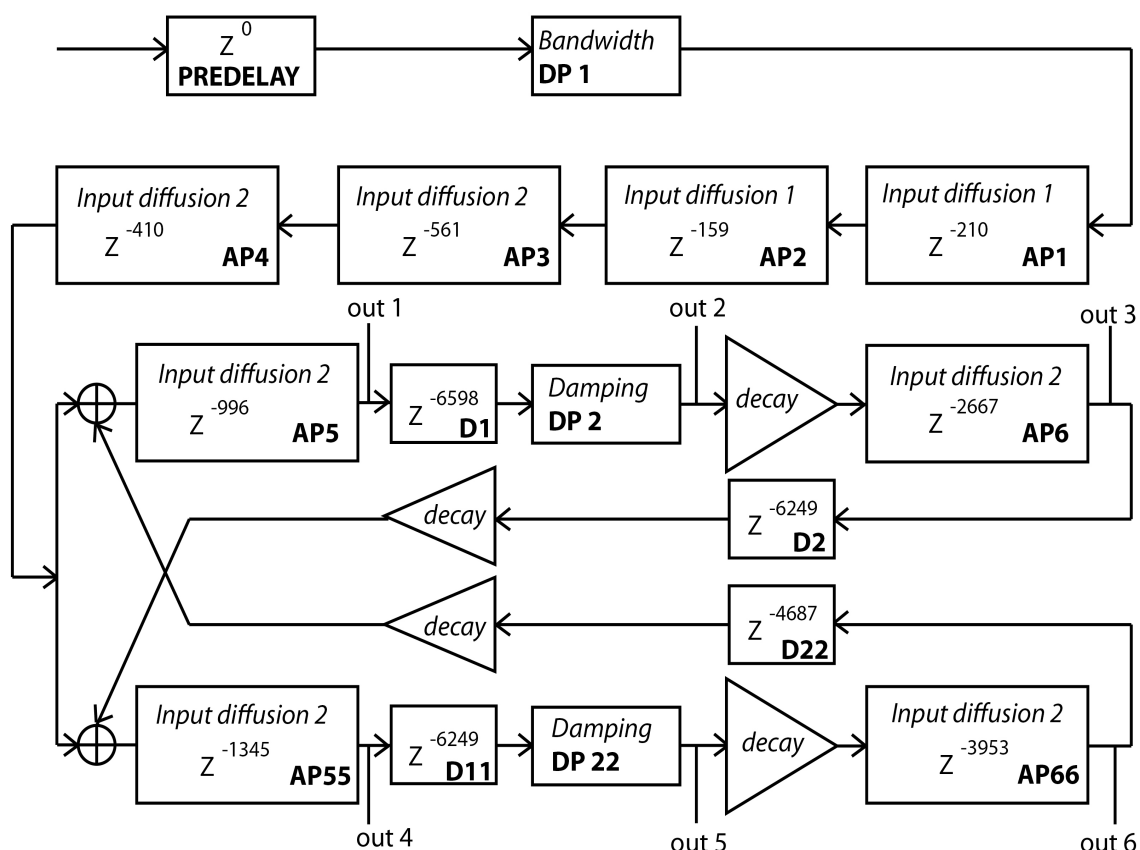
3.3.1 Špecifikácia a implementácia reverberátoru

Prvá fáza reverberátoru má za úlohu pripraviť signál na spracovanie v tanku dekoreláciou. Na dekoreláciu slúžia štyri sériovo zapojené fázovacie články, pred ktorými je umiestnená dolná priepustnosť, ktorou môžeme kontrolovať spektrum vstupného signálu – pre prípad v tejto práci je ponechaný medzný kmitočet tejto dolnej priepustnosti na hodnotu, ktorá spektrum vstupného signálu necháva pôvodné. Toto nastavenie je všeobecne vhodné pre väčšinu vstupných signálov, v určitých prípadoch sa však filtrácia dolnou priepustnosťou na vstupe môže hodiť. Fázovacie články sú ovládané dvoma parametrami odpovedajúcimi zosileniam filtrov. V prípade, že by signál neprešiel touto fázou, recirkulácia v tanku by sa mohla prejavíť vnemom určitej periodicity vo výslednom signále. Toto je obzvlášť badateľné pri signáloch perkusívneho charakteru. Na dekoreláciu sa môžeme pozeráť ako na randomizáciu fázy signálu a odstránenie výrazných špičkových hodnôt v signále. V prípade, že sa koeficienty ovládajúce zosilenie blížia k nule, signál nebude vôbec dekorelovaný. V opačnom prípade, ak sa budú koeficienty výrazne blížiť k jednej, prejaví sa na to na výslednom zvuku šumením. Optimálnej difúzie dosiahneme pokiaľ sa koeficienty budú blížiť k absolútnej hodnote 0,5. Hodnota zosilení väčšia ako jedna by viedla k nestabilite fázovacích článkov. V prípade, že zvolíme pre dvojicu fázovacích článkov negatívne zosilenie, prejaví sa to zmenou charakteru impulznej odozvy – prenosová funkcia fázovacieho článku však ostane rovnaká. Negatívne zosilenie je použité

u dvojice fázovacích článkov ktoré sú na obr. 3.8 označené parametrom *decay diffusion* *I*. Dekorelačná fáza sa v praxi prejaví rýchlym zahustením impulznej odozvy ešte pred vstupom do tanku.

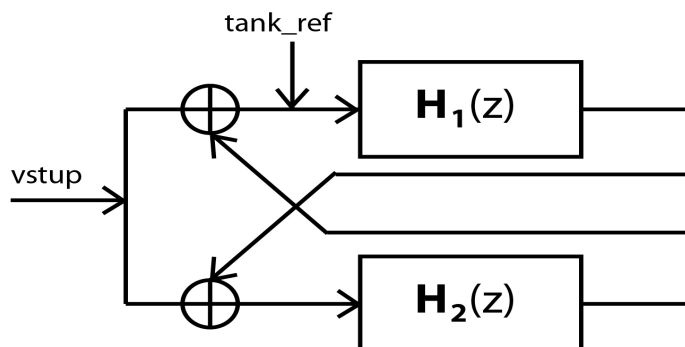
Dolné priepustnosti v štruktúre tanku simulujú frekvenčne závislú absorbciu, zatiaľ čo zosilenia kontrolované parametrom *decay* určujú, ako rýchlo bude signál doznievať. Výsledný signál je sumou jednotlivých signálov odobraných z rôznych miest tanku, ktoré môžeme vidieť na obrázku 3.8 označené ako *out*. Tento výstupný signál odpovedá plne „mokrému“ signálu.

Oneskorenia jednotlivých prvkov reverberátoru sú v pôvodnom návrhu od Dattora určené experimentálne pre vzorkovací kmitočet 29.8 kHz, ktorý je už dostatočný pre realistickú reverberáciu, nakoľko vysoké frekvencie sú pri reverberácii absorbované viac ako nízke. V našom prípade však pracujeme s vzorkovacím kmitočtom 44.1 kHz, a tak je nutné hodnoty oneskorení prispôbiť. V schéme na obrázku 3.8 sú hodnoty oneskorenia už prepočítané pre tento vzorkovací kmitočet.



Obr. 3.8: Celková bloková schéma Dattorovho reverberátoru. DP označuje dolné priepustnosti, AP fázovacie články, D oneskorenia. Kurzívou sú označené parametre ovládajúce reverberátor pod názvami použitými v implementovanom programe. Out približne označuje miesta odkiaľ sa odoberá výstupný signál, nakoľko v určitých prípadoch sa odoberá priamo zo zásobníku fázovacieho článku (obr. 3.10).

Implementácia reverberátoru pozostáva z dvoch častí. V prvej časti je sériové zapojenie prvkov v dekorelačnej časti zjednodušené na jednu prenosovú funkciu, ktorou je filtrovaný vstupný signál. Ten je ďalej prefiltrovaný prenosovou funkciou tanku. Takto získame referenčný signál *tank_ref* ako môžeme vidieť na obrázku nižšie.



Obr. 3.9: Zjednodušená štruktúra tanku.

Prenosová funkcia vstupného signálu *vstup* k signálu *tank_ref* je definovaná ako

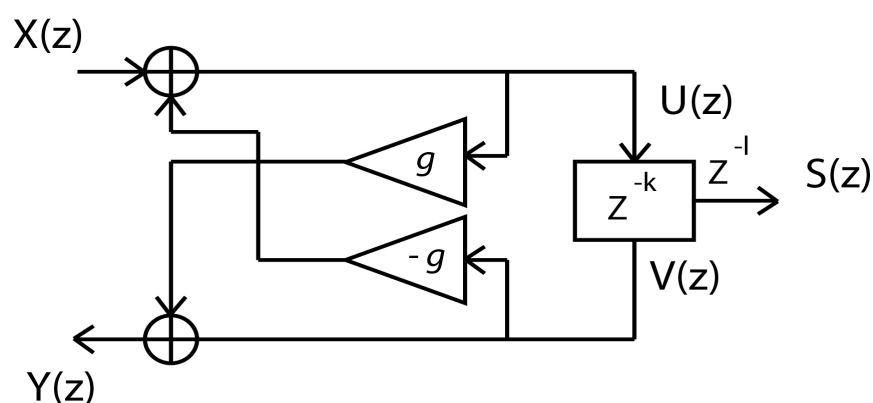
$$T(z) = \frac{vstup}{tank_ref} = \frac{1 + H_2(z)}{1 - H_1(z)H_2(z)}. \quad (3.10)$$

pričom prenosové funkcie $H_1(z)$ a $H_2(z)$ získame sériovým spojením filtrov v oboch vetvách tanku. Po získaní signálu *tank_ref* tento signál postupne filtrujeme cez jednotlivé filtre a odoberáme vzorky v určitých miestach štruktúry, pre ľavý aj pravý kanál. Výstupný signál pre ľavý a pravý kanál získavame postupným oneskorením signálu v špecifických bodoch štruktúry tanku, ktoré sú na obrázku 3.8 označené ako out. V určitých bodoch je nutné oneskoriť priamo signál zo zásobníku fázovacieho článku čo dosiahneme oneskorením signálu $S(z)$, ktorý získame podľa vzťahu 3.11. Extrakciu signálu zo zásobníka môžeme vidieť na obrázku 3.10.

$$S(z) = \frac{z^{-l} X(z)}{1 + gz^{-k}}. \quad (3.11)$$

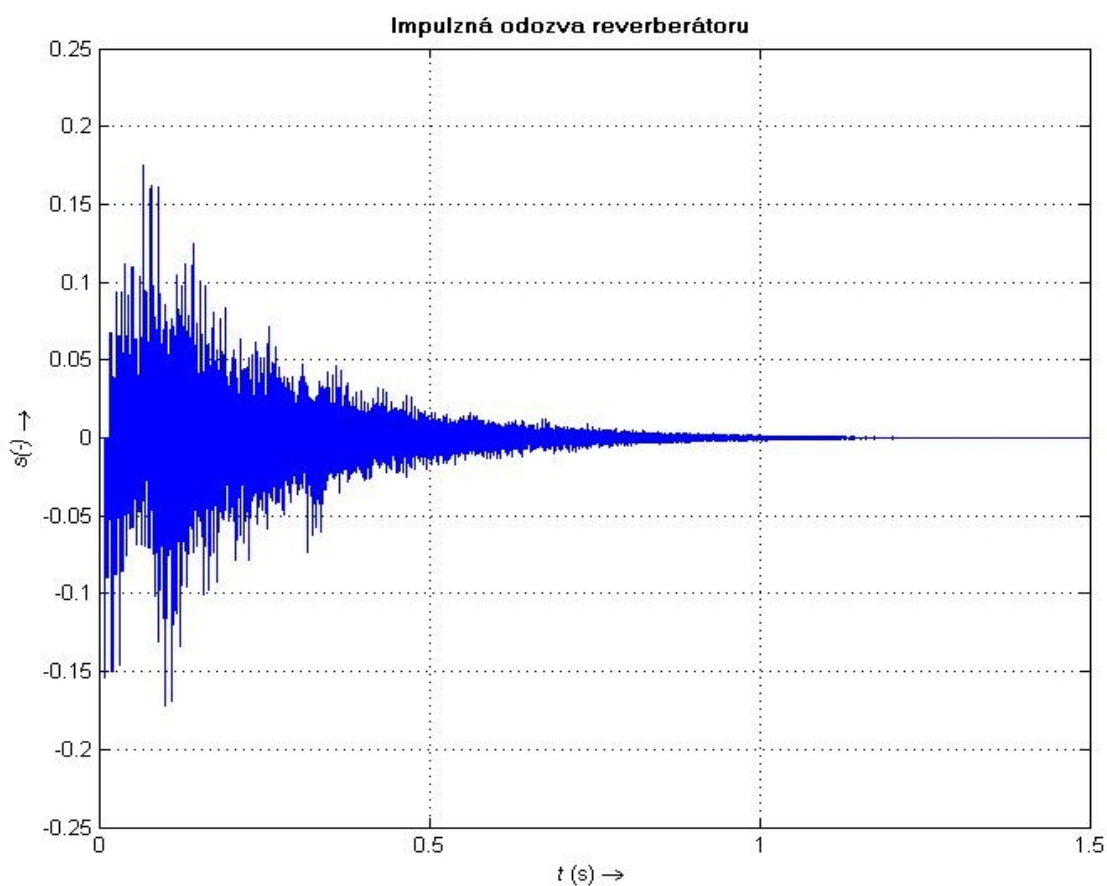
Výstupom reverberátoru je stereo signál, hoci algoritmus pracuje len s mono signálom. Použitím rôznych oneskorení a negatívneho, respektíve pozitívneho zosilenia pre rôzne miesta z ktorých odoberáme výstupný signál sú však z mono signálu vytvorené dva kanály, ktoré tvoria výstupný signál.

Výsledný reverberátor je z výpočtového hľadiska efektívny. Jednou z mála nevýhod tohto algoritmu je, že je určený iba na modelovanie difúzneho dozvuku, a tak je pomocou neho pomerne ťažké aproximovať reálne priestory s krátkou dobou dozvuku, ako je ukázané v záverečnej kapitole, kde sa pomocou tohto reverberátoru nepodarilo nasimulovať priestor laboratória s najmenšou dobou dozvuku.



Obr. 3.10: Extrakcia signálu $S(z)$ z vnútorného zásobníku fázovacieho článku.

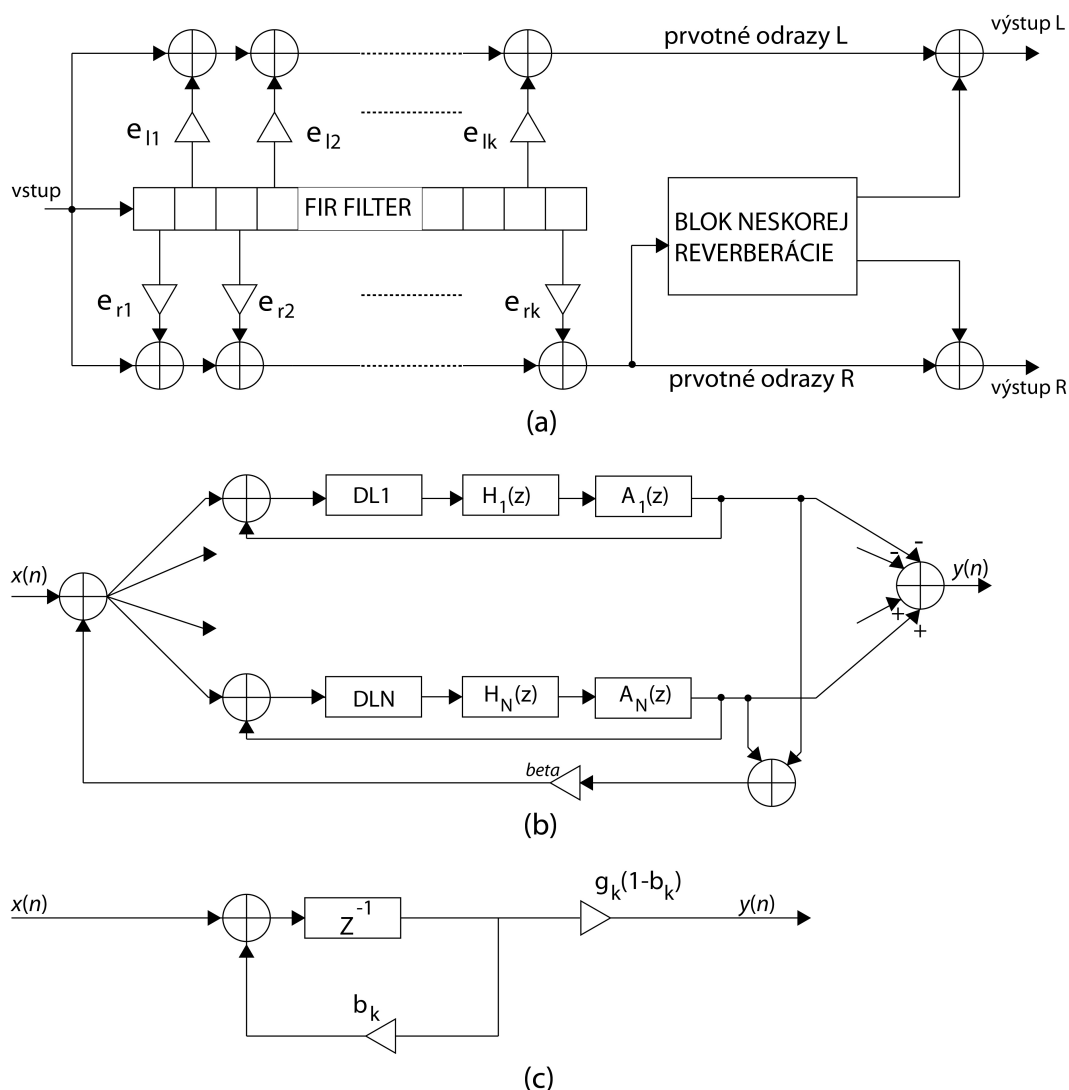
Ďalšou drobnou nevýhodou je šum prítomný v reverberovanom signále v prípade, že je výstupom algoritmu iba efektovaný signál. Tento nedostatok je však odstránený zaradením zosilnenia upravujúceho pomer originálneho a efektovaného signálu. Výsledná impulzná odozva reverberátoru je zobrazená na obrázku nižšie.



Obr. 3.11: Impulzná odozva ľavého kanálu Dattorrovho reverberátoru.

3.4 Väänänenovej reverberátor

Väänänenová v [29] navrhuje reverberátor, ktorý je inšpirovaný v rovnakej miere Moorerovým reverberátorom a FDN. Z Moorerovho reverberátora si berie paralelné zapojenie hrebeňových filtrov s dolnou priepustnosťou, zo spätnoväzbových oneskorovacích sietí zase závislosť vstupu každej linky na výstupe každej linky. Navyše pridáva do každej slučky hrebeňového filtra aj fázovací článok, ktorý má za následok, že impulzná odozva je zahustená ešte rýchlejšie ako u vyššie spomínaných reverberátorov u ktorých sa Väänänenová inšpirovala. Reverberátor pozostáva z FIR filtru zabezpečujúceho prvé odrazy, a bloku zabezpečujúceho difúzny dozvuk. Celková schéma reverberátora je na obrázku nižšie.

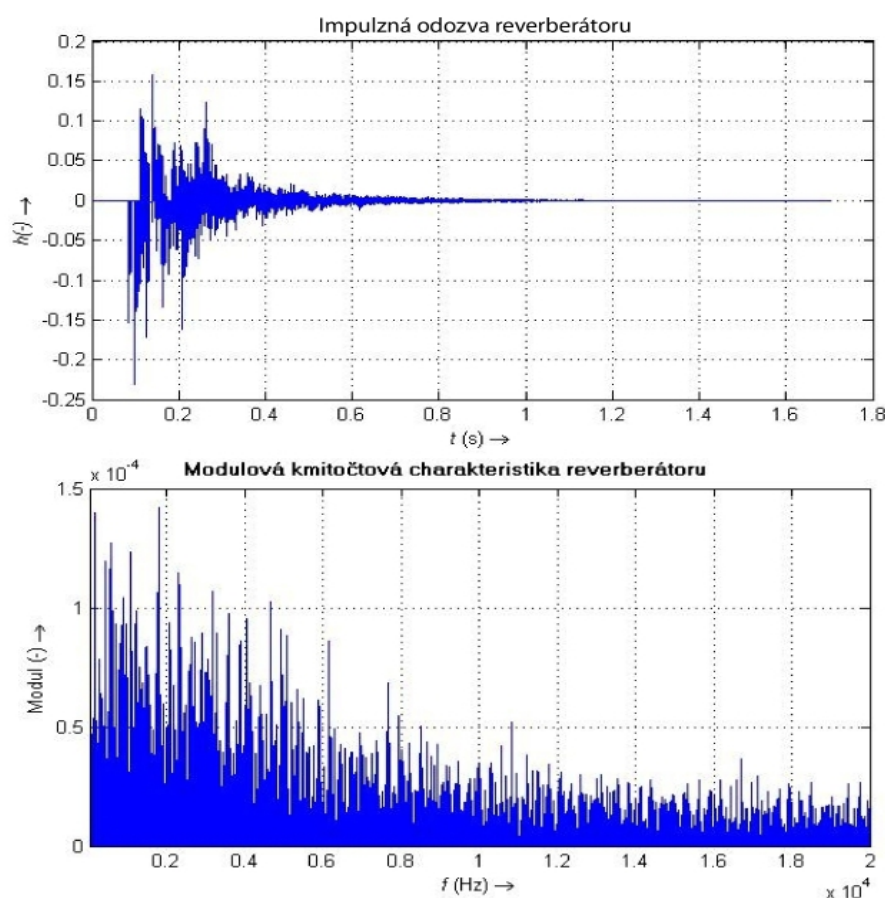


Obr. 3.12: a) Celkové schéma Väänänenovej reverberátoru. b) Schéma bloku neskorej reverberácie. DL označuje oneskorenie, $H(z)$ označuje dolné priepustnosti a $A(z)$ označuje fázovacie články. c) Blokové schéma dolnej priepustnosti $H_n(z)$.

Štruktúra využíva mierne odlišnú implementáciu dolnej priepustnosti ako je u reverberátorom zvykom. Prenosová funkcia tejto dolnej priepustnosti má tvar

$$H(z) = \frac{(g - gb)z^{-1}}{1 - bz^{-1}}. \quad (3.12)$$

Spätnoväzbová štruktúra je špeciálnym prípadom FDN siete s unitárnou kruhovou maticou s odlišnými zosileniami na diagonále oproti ostatným prvkom matice. Výsledná impulzná odozva neskorej reverberácie je sumou impulzných odoziev jednotlivých liniek, pričom prvé dve linky sú odčítané v snahe dosiahnuť čo najplochejšiu modulovú kmitočtovú charakteristiku reverberátoru. Signál prefiltrovaný cez túto impulznú odozvu je vo výsledku pričítaný k signálu prefiltrovanému FIR filtrom zabezpečujúcim prvotné odrazy. Ide o pseudostereo reverberátor, takže i v prípade, že je vstup mono, výstupom bude vždy stereo, pričom rozdiel medzi kanálmi vznikne filtráciou cez rôzne impulzné odozvy pre ľavý a pravý kanál pri modelovaní prvotných odrazov cez FIR filter.



Obr. 3.13: Impulzná odozva ľavého kanála reverberátoru a príslušná modulová kmitočtová charakteristika.

3.5 Porovnanie implementovaných reverberátorov

V práci bol vytvorený skript, ktorý počíta objektívne parametre priestoru popísané v tejto práci. V tabuľke 1 môžeme vidieť hodnoty týchto parametrov vypočítané z impulzných odoziev jednotlivých reverberátorov. Treba dodať, že parameter interaurálnej vzájomnej korelácie IAAC je počítaný iba ak je výstupná impulzná odozva stereofónna, čo u Jotovho reverberátoru implementovaného v tejto práci nie je. Takisto kritérium ozveny je vektor hodnôt, takže v tabuľke je uvedená iba maximálna hodnota, ktorá je z hľadiska posúdenia rušivosti ozveny najdôležitejšia. Reverberátory boli nastavené na zhruba rovnakú hodnotu doby dozvuku, aby mal porovnanie jednotlivých parametrov reálnu výpovednú hodnotu.

	Jotov reverberátor	Dattorov reverberátor	Rafiiho reverberátor	Väänänenovej reverberátor
RT [s]	1,02	1,02	0,989	1,05
EDT [s]	1,5	1,33	1,25	1,21
BR	1	1,09	0,97	1,05
HFR	0,988	1,42	1,03	1,23
C ₇ [dB]	-29,6	-37,7	-30	-35,9
C ₅₀ [dB]	-9,84	-15,2	-5,94	-4,95
C ₈₀ [dB]	-2,7	-6,4	1,11	1,87
D ₅₀ [%]	9,39	2,92	20,3	24,2
T _s [ms]	122	125	106	152
H [dB]	9,84	15,2	5,94	4,95
IACC	-	0,0408	0,708	0,117
ITDG [ms]	9,5	16,2	10,9	62,2
max EK	0,919	0,82	0,999	1,05

Tabuľka č.1: Porovnanie objektívnych parametrov akustického priestoru u štyroch reverberátoroch implementovaných v tejto práci.

Ak porovnáme odporúčané hodnoty pre akustický priestor s tabuľkou 1, ako najlepší reverberátor sa javia približne rovnako Väänänenovej a Rafiiho reverberátor, v tesnom závese s Jotovým. Najhoršie je na tom Dattorov reverberátor. Treba však podotknúť, že pre každú situáciu sa hodí mierne iný druh reverberácie, takže v rôznych situáciach môže byť Dattorov reverberátor vhodnejší ako iné, a naopak. Takisto treba podotknúť, že odporúčané hodnoty v literatúre sa vzťahujú ku koncertným sálam,

kdežto priestor simulovaný v tomto porovnaní je neporovnateľne menší a menej reverberujúci. Keď sa však pozeráme na reverberátory z hľadiska doporučovaných hodnôt pre koncertné sály, Rafiiho reverberátor vedie, a to predovšetkým aj kvôli jeho minimálnej výpočetnej náročnosti. Všetky implementované reverberátory sa dajú implementovať viacerými spôsobmi, a ani u jedného z algoritmov v tejto práci neprebehla optimalizácia – sú to tak povediac iba funkčné prototypy, ktoré implementujú algoritmy popísané v literatúre, pričom nebol kladený dôraz na to, aby bol ich výpočet optimalizovaný. Z tohto hľadiska je Rafiiho reverberátor spoločne s Dattorrovým najrýchlejší. Nasleduje Väänänenovej a ako najviac náročný sa v mojej implementácii ukázal Jotov reverberátor. Časy výpočtu pre dobu dozvuku 1 sekunda sú nižšie:

Rafiiho reverberátor – 10.2 s

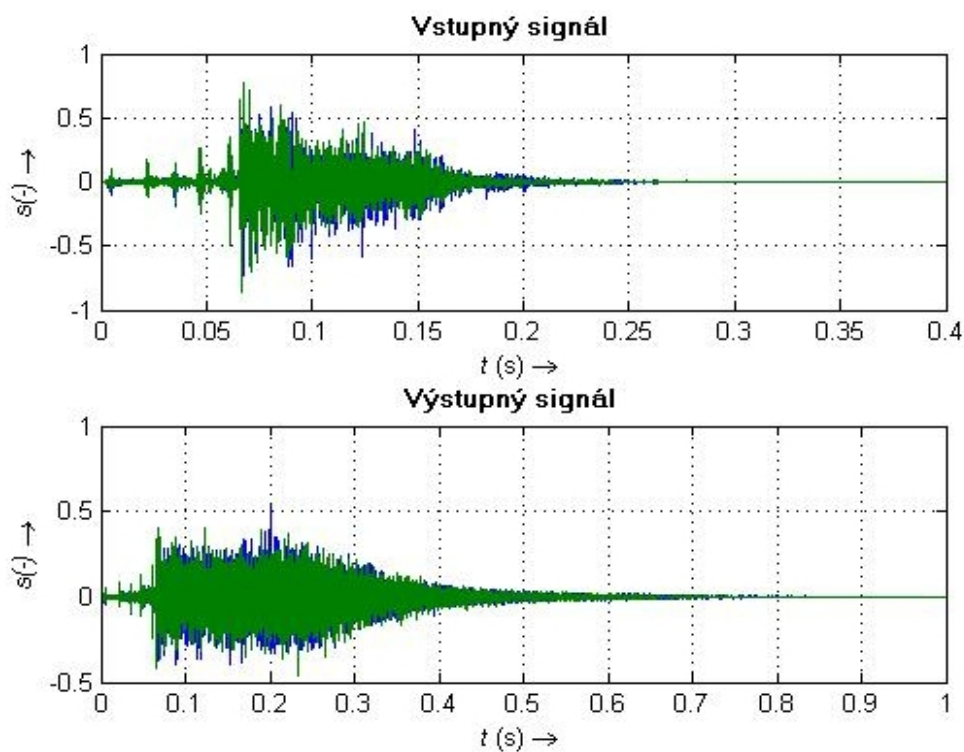
Dattorrov reverberátor – 12.8 s

Väänänenovej reverberátor – 13.4 s

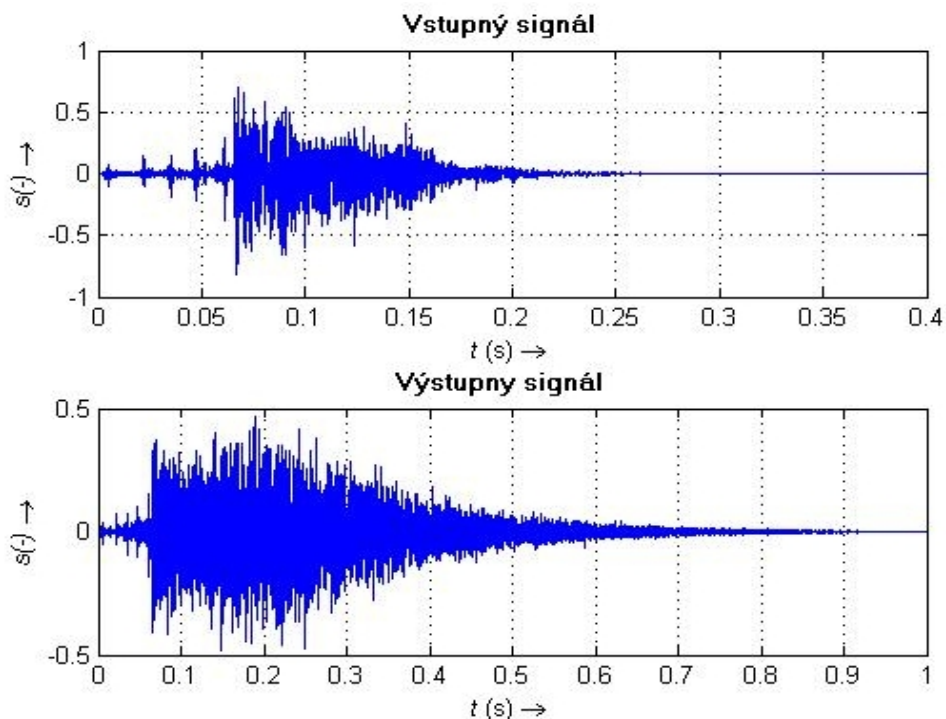
Jotov reverberátor – 111.9 s

Veľký rozdiel v spôsobenej náročnosti je pravdepodobne spôsobený požitím cyklu *for* v Jotovom reverberátore. Tento cyklus je v Matlabe všeobecne jeden z najpomalších a pokiaľ je to možné, je lepšie sa jeho použitiu vyhnúť. Ďalšiou výhodou dvoch výpočetne najmenej náročných reverberátorov je ľahká parametrizácia, kedy je možné celý reverberátor ovládať pár parametrami. To je samozrejme možné i v prípade Väänänenovej a Jotovho reverbu, ale spôsob akým sú implementované v tejto práci neumožňuje tak jednoduché nastavovanie parametrov ako Rafiiho alebo Dattorrov reverberátor. Tento nedostatok je zmiernený implementáciou grafického rozhrania. Ďalšou nevýhodou Jotovho reverberátoru je, že hoci výstupom môže byť stereo signál, je tomu tak iba v prípade, že je aj na vstupe. Navyše je každý kanál stereo súboru spracovávaný tou istou impulznou odozvou, čo mierne zhoršuje dojem z celej reverberácie. U zvyšných reverberátorov je výstupom vždy stereo signál, či už je to pseudostereo vytvorené z mono signálu, alebo pravé stereo vytvorené spracovávaním každého kanálu stereo signálu zvlášť. Hoci Dattorrov reverberátor dopadol v porovnaní na základe objektívnych parametrov akustického priestoru najhoršie, ako u jediného uňho nebol zaradený FIR filter, čo sa na kvalite ostatných reverberátorov pozitívne podpísalo. Subjektívny vnem z reverberácie viacmenej odpovedá objektívnym výsledkom. Žiadny z reverberátorov nemá prílišný metalický charakter, u všetkých sú výsledky uspokojivé, no nie sú porovnateľné s profesionálnymi algoritmi. To však ani nebolo cieľom. U Dattorrovho reverberátoru v prípade nastavenia výstupu ako čisto efektovaného signálu, sa objavuje mierny šum. Ten však pri zmiešaní signálu

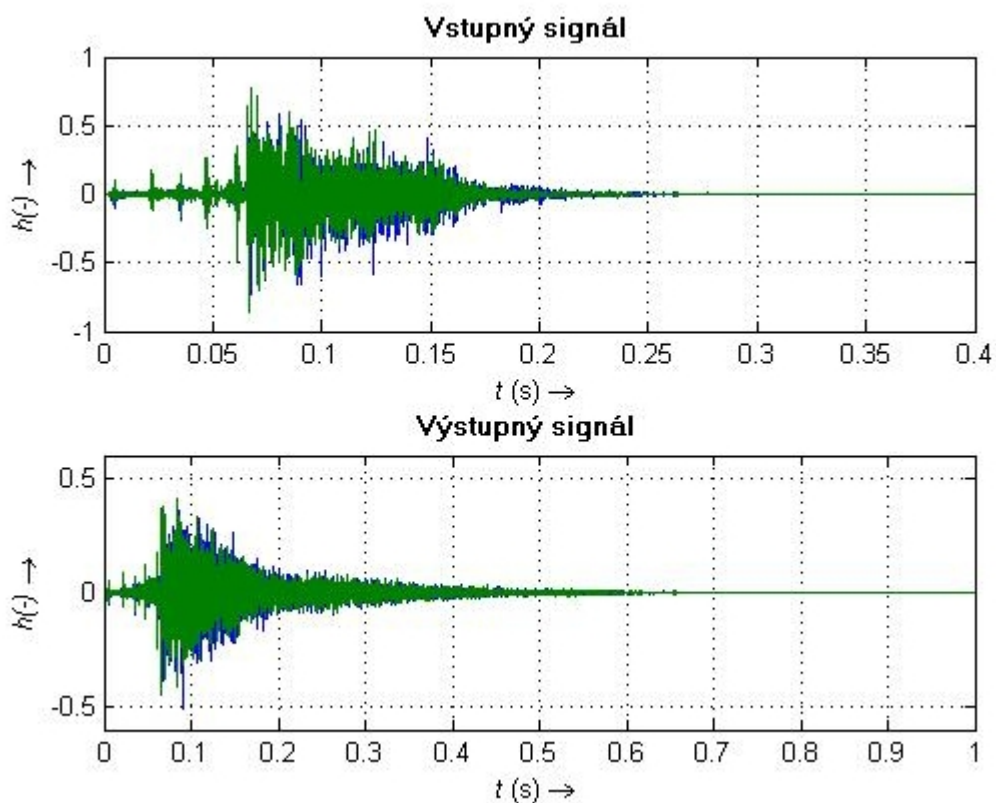
s pôvodným značne klesá. Nižšie sú zobrazené vstupné a výstupné reverbované signály jednotlivých algoritmov. Ako vstupný signál bol použitý stereo signál úderu na malý bubon. Pomer dry/wet je na všetkých obrázkoch nižšie 0,5.



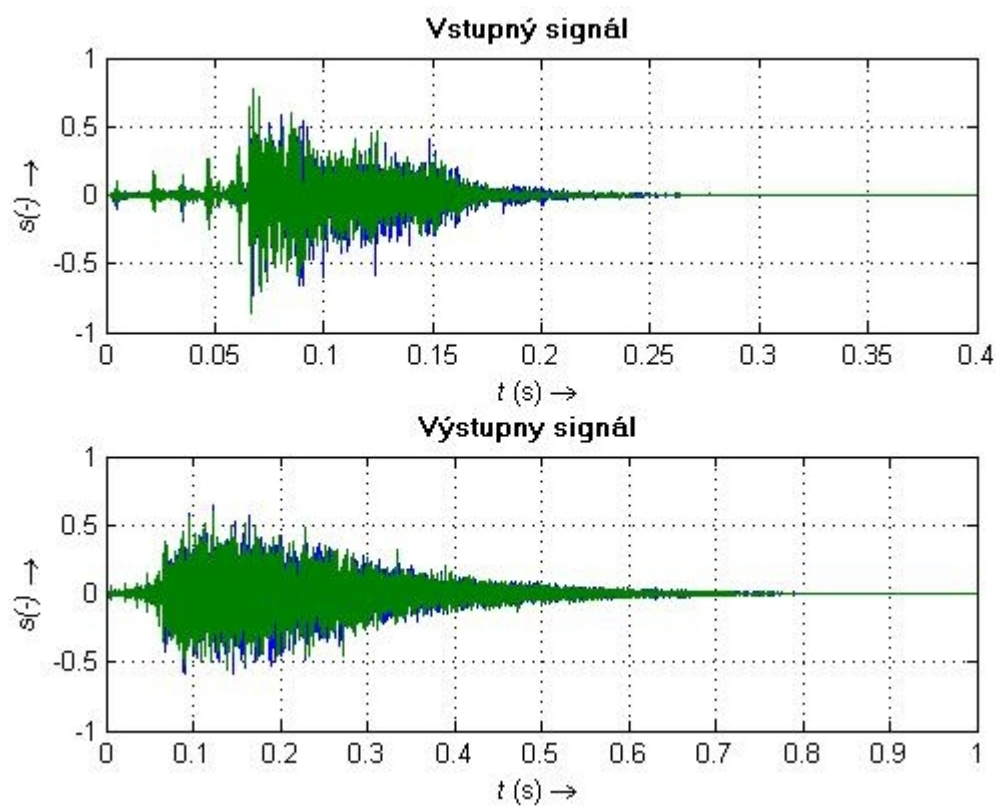
Obr 3.14: Vstupný a výstupný signál Dattorroho reverberátoru



Obr. 3.15: Vstupný a výstupný signál Jotovho reverberátoru



Obr. 3.16: Vstupný a výstupný signál Väänänenovej reverberátoru



Obr. 3.17: Vstupný a výstupný signál Rafiiho reverberátoru

Žiaden z implementovaných reverberátorov nezní príliš prirodzene pokiaľ je výstupom iba reverbovaný signál. To je samozrejme prirodzené – v realite je reverberácia tiež kombináciou samotného dozvuku a priameho zvuku. Takisto v hudobnom použití sa veľmi zriedkavo používa iba reverbovaný signál.

3.6 Postupy pri implementácii reverberátorov

Pri implementácii všetkých reverberátorov boli použité určité spoločné postupy. Matlab poskytuje radu užitočných funkcií, ktoré sa dajú pri implementácii reverberátorov dobre využiť. Základné použité funkcie boli *impz* a *tf*. *Impz* vytvorí z čitateľa a menovateľa prenosovej funkcie impulznú odozvu. Vstupnými parametrami tejto funkcie je čitateľ a menovateľ prenosovej funkcie, najčastejšie vo vektoroch. Voliteľným parametrom je dĺžka vytvorenej impulznej odozvy. Tú je dôležité nastaviť v prípade, že systém ktorého impulznú odozvu chceme vytvoriť je kombináciou viacerých jednoduchších filtrov, respektíve v prípade, že menovateľ a čitateľ prenosovej funkcie je veľmi dlhý. Ak totižto tento parameter nezadáme, Matlab sa vie na danom príkaze zaseknúť a impulznú odozvu počíta desiatky minút. Funkcia *tf* takisto z čitateľa a menovateľa prenosovej funkcie vytvorí model systému pomocou tejto funkcie (defakto prenosová funkcia systému). To je veľmi praktické, nakoľko takéto systémy je možné spolu spájať a zjednodušovať tak celé zapojenie, čo je v práci hojne využívané. K obidvom vyššie popísaným príkazom nám stačí poznať prenosovú funkciu štruktúry. V prípade, že máme viac filtrov za sebou, z každého si môžeme vytvoriť pomocou funkcie *tf* model, a zlúčiť ich do jedného pomocou ďalšej vstavanej funkcie matlabu a to *series*. Tento príkaz spojí sériovo dva modely – v prípade, že máme oba systémy definované pomocou *tf* je možné toto previesť aj pomocou aritmetickej operácie násobenia. To isté platí aj pre paralelné zapojenie prvkov – použijeme príkaz *parallel* alebo aritmetickú operáciu súčtu, respektíve rozdielu. Tieto isté operácie sa dajú previesť aj v prípade, že sme k reprezentácii filtru použili jeho impulznú odozvu vytvorenú funkciou *impz*. Impulzná odozva dvoch sériovo zapojených prvkov je produktom konvolúcie ich jednotlivých impulzných odoziev, zatiaľčo pri paralelnom zapojení je výsledná impulzná odozva súčtom príspevkov jednotlivých vetiev. Pomocou vyššie popísaných príkazov je možné systémy zjednodušovať a reprezentovať ich pomocou ich prenosových funkcií, z ktorých potom môžeme pomocou príkazu *tfdata* získať menovateľ i čitateľ tejto funkcie pomocou ktorých ľahko vytvoríme impulznú odozvu.

Ďalším hojne používaným príkazom je príkaz *feedback*, ktorý spojí dva systémy do spätnej väzby. Má dva povinné parametre, jeden reprezentuje systém v priamej vetve a druhý v spätnej väzbe, pričom tretí voliteľný parameter je defaultne nastavený na hodnotu -1, ktorá predpokladá zápornú spätnú väzbu. V prípade, že je tento parameter nastavený na 1, ide o pozitívnu spätnú väzbu. Tento príkaz je hojne použitý napríklad

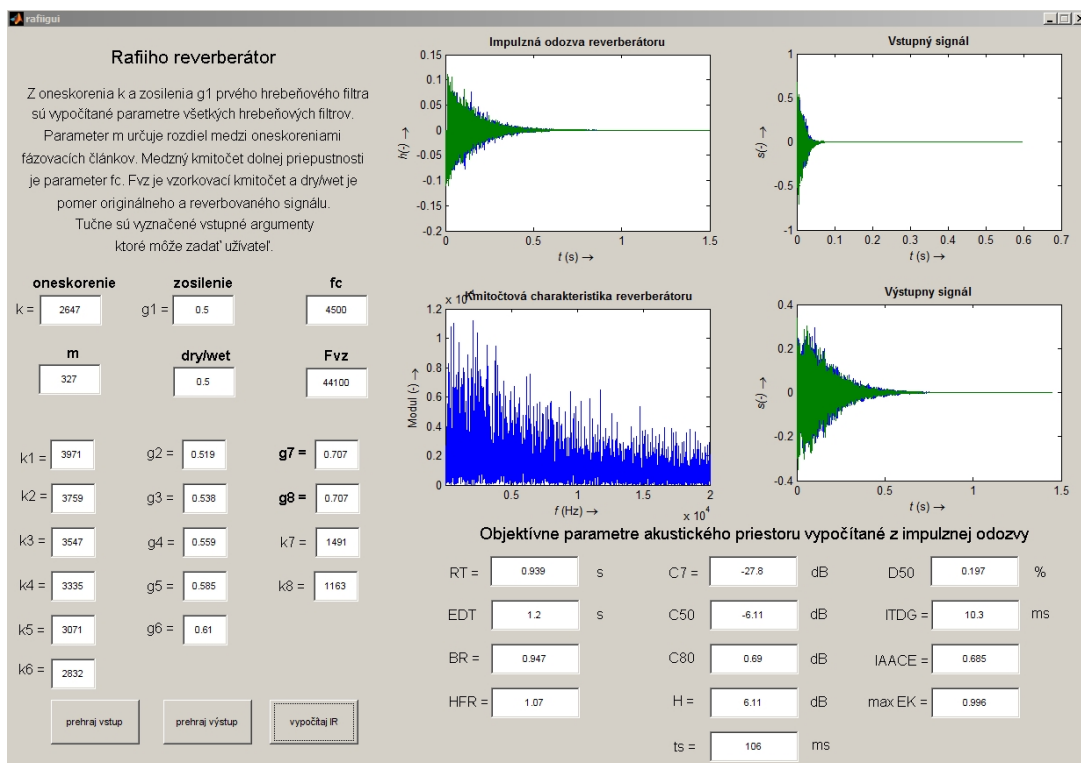
pri Väänänenovej reverberátore. Reverberácia je v každom z implementovaných reverberátorov prevedená cez konvolúciu vstupného signálu s impulznou odozvou reverberátoru. Na to aby sme mohli túto operáciu previesť je nutné aby mali oba signáli rovnakú dĺžku, čo je možné dosiahnuť pomocou príkazu *eqtflength*. Ten zarovná oba signály na rovnakú dĺžku tak, že k nim pridá, respektíve odoberie z nich nuly. Výsledok konvolúcie bude signál ktorý má dĺžku $2N-1$ kde N je dĺžka jedného z konvolvovaných signálov. Na toto je treba myslieť, pretože občas vie mnohonásobne konvolvovaný signál nabrat' veľmi veľkú dĺžku, hoci nemá na svojom konci takmer žiadnu informáciu. Z tohto hľadiska je rozumnejšie na filtrovanie vstupného signálu použiť funkciu *filter*, ktorá je okrem iného aj značne rýchlejšia. Tá ma však nevýhodu v tom, že pokiaľ ňou filtrujeme do výstupnej premennej a *filter* signál oneskorí tak, že vzorky by mali byť aj mimo rozsah ukazateľov premennej do ktorej sa ukladá, táto premenná sa automaticky neprispôsobí oneskorovanému signálu, a vzorky prekračujúce jej rozsah ignoruje. V prípade, že nezadefinujeme dost' veľké rozsahy premenných do ktorých budeme ukladať filtrované signály, môže dôjsť k nenahraditeľnej strate signálu. Rýchlosť spracovania je však oproti konvolúciám omnoho väčšia. V pôvodnej verzii algoritmu bol Väänänenovej reverberátor realizovaný pomocou konvolúcie. Po nahradení operácií konvolúcie funkciou *filter* sa doba realizácie algoritmu zmenšila zo zhruba 100 sekúnd na necelých 15 pri rovnakej dobe dozvuku. Z tohto hľadiska je použitie funkcie *filter* veľmi žiadúce.

Ďalšiou hojne využívanou funkciou je funkcia *vektorplus*, ktorú som si vytvoril nakoľko Matlab nie je schopný sčítavať vektory rôznych dĺžok. To mi v mnohých prípadoch prišlo žiadúce, a tak som naprogramoval drobnú funkciu, ktorá je schopná tejto operácie. Tá sa dá s úspechom využiť napríklad pri kombinácii impulzných odoziev FIR filtru a neskorej reverberácie v prípade, že je FIR filter zapojený paralelne k štruktúre mnohonásobných odrazov. Vo Väänänenovej reverberátore je táto funkcia použitá na sčítavanie príspevkov impulzných odoziev z jednotlivých liniek. Celkovo je to veľmi užitočná funkcia, ktorá je využitá v každom z reverberátorov.

Súčasťou práce je i skript na vyhodnotenie objektívnych parametrov akustického priestoru. Ten bol realizovaný za pomoci funkcie *octdesign* z toolboxu *octave*. Táto funkcia slúži na vytvorenie banky pásmových priepustností s medznými kmitočtami odpovedajúcimi medzným kmitočtom jednotlivých oktáv. Ďalej funkcia na integrovanie impulzných odoziev využíva funkcie *trapz* čo je funkcia využívajúca na aproximáciu integrálu lichobežníkovej metódy.

K reverberátorom bolo vytvorené i grafické rozhranie umožňujúce jednoduchšie meniť parametre jednotlivých štruktúr a sledovať zmeny akými sa prejavajú na výslednej impulznej odozve a objektívnych parametroch. K vytvoreniu grafického rozhrania bol použitý v Matlabe vstavaný editor *Guide*. Ukážka grafického rozhrania jedného

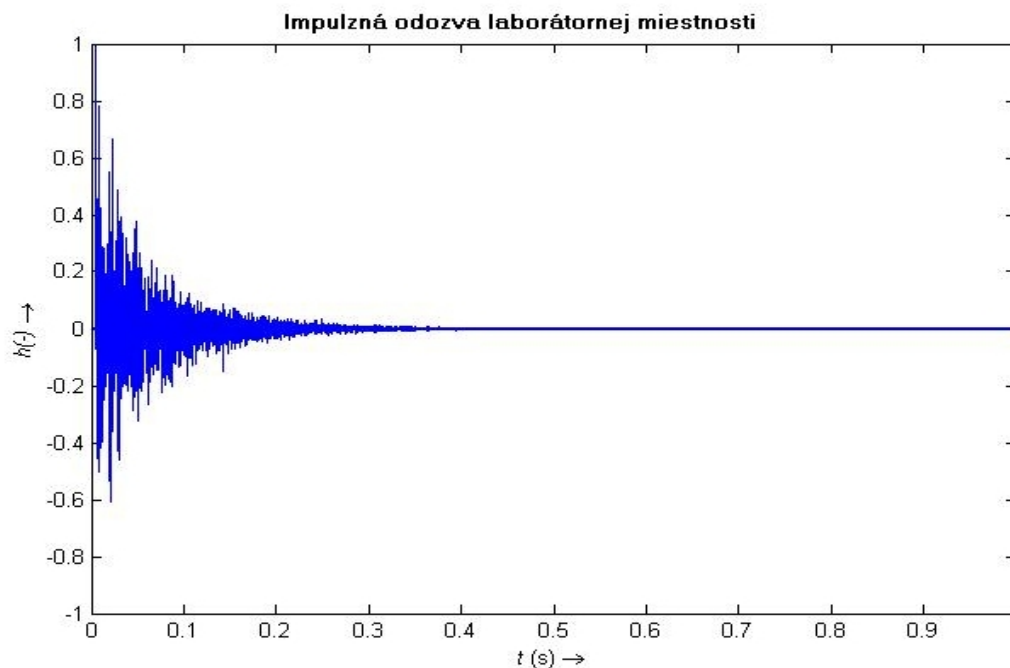
z implementovaných reverberátorov je na obrázku nižšie.



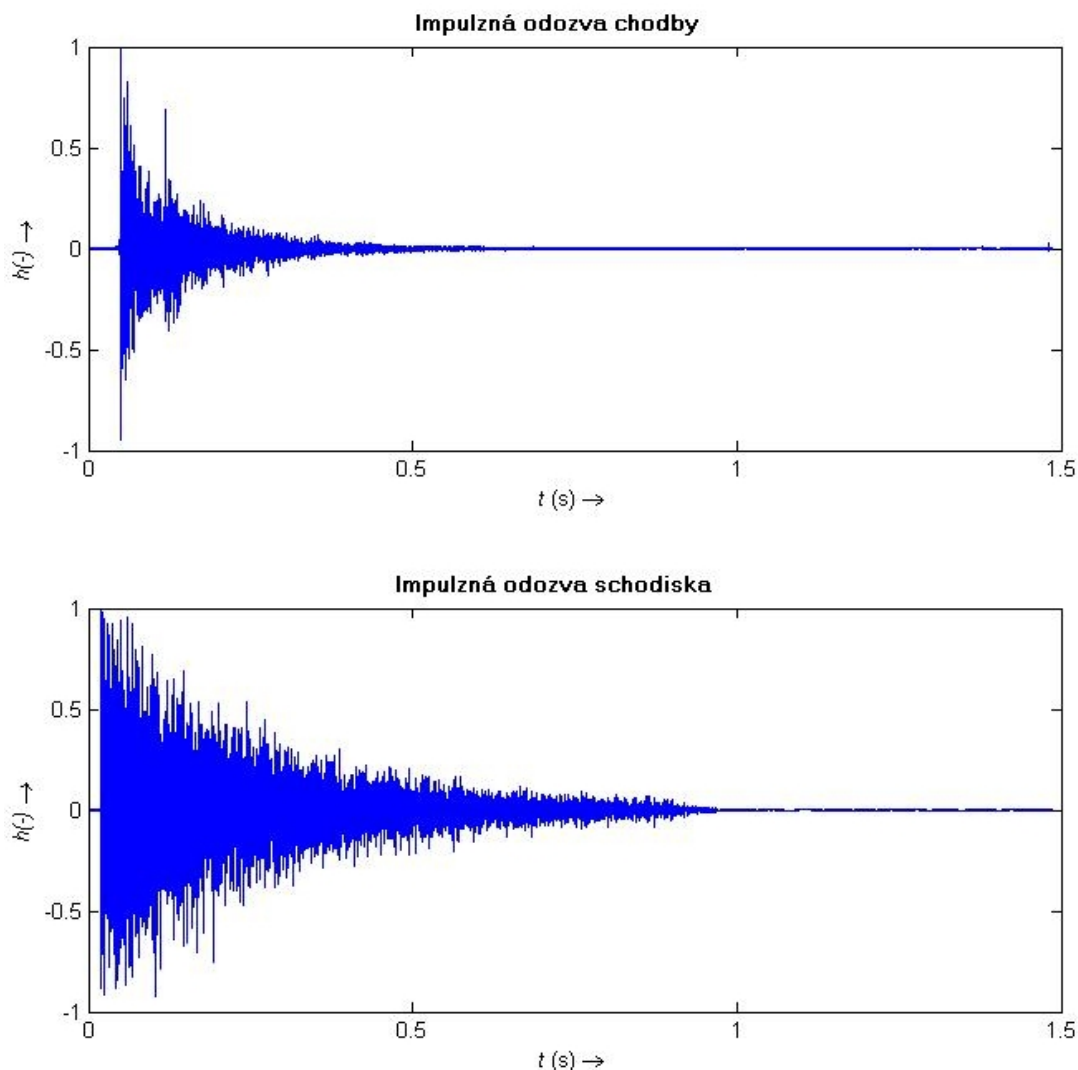
Obr. 3.18: Ukážka grafického rozhrania Rafiho reverberátoru

4 Meranie impulznej odozvy

Súčasťou práce bolo i meranie impulznej odozvy v laboratórnych podmienkach. Táto kapitola popisuje toto meranie a následný experiment naň naviazaný. Meranie bolo prevedené v laboratóriách štúdiovej a hudobnej elektroniky, na chodbe a na schodisku v budove VUT na ulici Technická 12, Brno. Cieľom bolo zmerať impulznú odozvu miestnosti pri viacerých rozloženiach mikrofónu a zdroja, zistiť jej objektívne akustické parametre a pomocou nastavenia reverberátorov implementovaných v tejto práci sa snažiť čo najviac týmto parametrom priblížiť. Na meranie bol použitý všesmerový reproduktor a mikrofón určený na meranie impulznej odozvy, zosilovač, externá zvuková karta a PC so softwarom EASERA. Tento software je možné využiť ako 30 dennú trial verziu, a v prípade PC v laboratóriu je zakúpená licencia. Výsledkom merania sú tri impulzné odozvy získané priemerom z jednotlivých meraní. V laboratórnej miestnosti bolo nameraných celkovo desať impulzných odoziev, pri dvoch rôznych polohách reproduktora vždy päť rôznych polôh mikrofónu. Na chodbe a schodisku bolo už prevedených iba päť meraní s rôznymi polohami mikrofónu pre jednu polohu reproduktora. Výsledné impulzné odozvy boli získané jednoduchým priemerom z týchto impulzných odoziev. Tieto impulzné odozvy boli analyzované skriptom na zistenie objektívnych parametrov akustického priestoru. Výsledky môžeme vidieť v tabuľke 2. Treba dodať, že namerané impulzné odozvy boli jednokanálové, takže objektívny parameter IAACE vyžadujúci stereo impulznú odozvu nemohol byť vypočítaný.



Obr. 4.1: Zmeraná impulzná odozva laboratória.



Obr. 4.2: Zmeraná impulzná odozva chodby a schodiska.

Výsledky merania sú očividné už z grafov impulzných odoziev. Najdlhšiu dobu dozvuku má schodisko, po ňom nasleduje chodba a najmenšia reverberácia sa vyskytuje v laboratóriu. Ostatné objektívne parametre môžeme vidieť v tabuľke 2. Z hľadiska doporučovaných parametrov pre koncertné sály tieto parametre samozrejme neobstoja príliš dobre, ale to je pochopiteľné – nie sú primárne určené na reprodukciu zvuku a tak pre ne platia iné pravidlá ako pre koncertné sály.

Úlohou tohto experimentu bolo porovnanie efektívnosti aproximácie reálnych priestorov pomocou implementovaných reverberátorov, respektíve určenie toho, ktorý reverberátor je najviac parametrický a ktorého parametre odpovedajú najviac subjektívnemu vnímaniu. S každým z implementovaných algoritmov bolo prevedené testovanie rôznych hodnôt nastavenia jednotlivých prvkov, s cieľom čo najviac sa priblížiť hodnotám objektívnych parametrov zmeraných impulzných odoziev. Táto

úloha je samozrejme v podstate nemožná, ale je možné sa nameraným parametrom priblížiť tak, aby aspoň zhruba odpovedali nameraným priestorom a subjektívny dojem z reverberácie sa približoval danému typu priestoru. Zpomedzi všetkých implementovaných reverberátorov sa na túto úlohu ako najvhodnejší ukázal Rafiiho reverberátor. Ten je ovládaný iba piatimi parametrami a jeho výpočetná náročnosť je spomedzi implementovaných algoritmov najmenšia. Priblížiť sa k hodnotám parametrov jednotlivých reálnych priestorov trvalo u tohto reverberátoru najkratšiu dobu. Napriek tomu nešlo o jednoduchú ani o príliš presnú aproximáciu – priblížiť sa hodnotám pre všetky tri priestory bola otázka intenzívnej experimentácie s parametrami, a výsledok nie je ani zďaleka ideálny – to dokazuje, že modelovanie reálneho priestoru algoritmickými reverberátormi nie je vôbec triviálna záležitosť. Všeobecne sa pri experimente ukázalo, že u všetkých reverberátorov bolo jednoduchšie aproximovať priestory s dlhšou dobou dozvuku, kdežto laboratórium sa modelovalo len s veľkými ťažkosťami. U Dattorrovho reverberátoru sa napriek snahe nepodarilo tento priestor namodelovať tak aby sa to dalo považovať za aspoň čiastočnú aproximáciu. Je to pravdepodobne spôsobené tým, že tento reverberátor ako jediný nemal implementované prvotné odrazy v podobe FIR filtra, a reverberácia u tohto priestoru pozostáva predovšetkým z nich. Všetky z implementovaných reverberátorov sú pôvodne určené predovšetkým na modelovanie difúzneho dozvuku, no k trom z nich je implementovaná aj fáza prvotných odrazov – vo všetkých prípadoch je to však vykonané pomocou FIR filtra, ktorý síce môže v modelovaní prvotných odrazov poskytovať vynikajúce výsledky, ovšem iba v prípade extenzívnej experimentácie s nastavením hodnôt, alebo ich simulácií pomocou šírenia vln v priestore alebo iných metód ktoré prekračujú záber tejto práce.

Veľmi problematickým sa pri aproximácii impulznej odozvy ukázal aj Jotov reverberátor, a to predovšetkým kvôli jeho výpočetnej náročnosti. Zadanie nových hodnôt parametrov a ich otestovanie je v súčasnej implementácii neraz záležitosťou takmer dvoch minút pre doby dozvuku dlhšie ako 1,5 sekundy. Toto je z hľadiska aproximácie obrovskou nevýhodou, nakoľko dosiahnutie použiteľného modelu priestoru je časovo mimoriadne náročnou záležitosťou už pri reverberátoroch, ktorých výpočetná náročnosť nie je príliš veľká. U Jotovho reverberátoru sa časová náročnosť tohto procesu zväčšuje viac ako desaťnásobne, a to ho z hľadiska modelovania priestoru robí takmer nepoužiteľným – hovorím samozrejme o algoritme implementovanom v tejto práci – Jotov reverberátor je prostredníctvom dedikovaných DSP (Digital Signal Processing) zariadení možné realizovať v reálnom čase, podobne ako je tomu u iných programovacích jazykov, respektíve i v Matlabe. Možnosťou ako tento algoritmus implementovať s minimálnou časovou náročnosťou v Matlabe, je použitie Simulinku, táto možnosť ovšem v tejto práci nebola realizovaná.

Dattorrov reverberátor je podobne ako Rafiiho veľmi jednoducho

manipulovateľný pomocou sady siedmich parametrov navrhnutých Dattorrom v jeho pôvodnom doporučení pre tento algoritmus. Je pravda, že pomocou týchto parametrov popísaných v kapitole 3 môžeme meniť určité charakteristiky reverberácie, no pre extenzívnejšie editovanie charakteru reverberácie je nutné meniť i oneskorenia jednotlivých prvkov, respektíve oneskorenie signálov z jednotlivých bodov štruktúry tanku z ktorých vzniká výstupný signál. To celú aproximáciu značne komplikuje, nakoľko nám počet parametrov značne narastie a závislosť medzi jednotlivými parametrami nie je triviálna. Napriek tomu sa u tohto algoritmu podarilo priblížiť nameraným impulzným odozvám schodiska a chodby bez väčších problémov. Laboratórium sa nepodarilo nasimulovať, pravdepodobne kvôli dôvodom spomínaným vyššie v tejto kapitole.

Väänänenovej reverberátor vykazoval v modelovaní reálneho priestoru dobré výsledky. S parametrami dolných priepustností nebolo takmer vôbec nutné manipulovať, stačilo meniť hodnoty oneskorenia jednotlivých liniek, a oneskorenia a zosilenia fázovacích článkov. Pomocou kombinácie týchto parametrov a nastavenia jednotlivých prvotných odrazov sa podarilo dosiahnuť výsledky zhruba odpovedajúce ostatným reverberátorom, pri odpovedajúcej časovej náročnosti. Zhrnutie dosiahnutých výsledkov je uvedené v tabuľke 3.

	Laboratórium	Chodba	Schodisko
Doba dozvuku RT [s]	0,565	1,06	1,35
Počiatková doba dozvuku EDT [s]	0,47	0,632	1,72
Miera hlbokých tónov BR	1,15	1,3	0,985
Miera vysokých tónov HFR	0,752	0,994	1,01
Miera priameho zvuku C_7 [dB]	-7,05	-24,5	-29,8
Miera zreteľnosti C_{50} [dB]	16,8	8,22	-7,97
Miera jasnosti C_{80} [dB]	26,9	14,9	-1,95
Zreteľnosť D_{50} [%]	97,9	86,9	13,8
Čas ťažiska impulznej odozvy t_s [ms]	37,2	94,9	157
Miera doznievania H [dB]	-16,8	-8,22	7,97
Počiatkové oneskorenie ITDG [ms]	5,19	48,6	19,4
max EK	0,575	2,11	1,18

Tabuľka 2: Objektívne parametre meraných priestorov.

	Laboratórium		Chodba		Schodisko	
	Rafii	Jot	Rafii	Jot	Rafii	Jot
RT [s]	0,562	0,568	1,07	1,04	1,37	1,33
EDT [s]	0,387	0,467	1	0,654	1,5	1,45
BR	1,15	1,04	1,08	1,11	0,981	0,992
HFR	0,898	0,98	0,971	0,789	1,01	1
C ₇ [dB]	-10	-13,2	-25	-28,2	-28,4	-37,4
C ₅₀ [dB]	17,6	9,06	5,05	4,12	-5,11	-9,34
C ₈₀ [dB]	26,8	18,2	9,19	14	-0,576	-2,54
D ₅₀ [%]	98,3	89	76,2	72,1	23,6	10,4
t _s [ms]	63,5	52,5	116	63,7	123	147
H [dB]	-17,6	-8,06	-5,05	-4,12	5,11	9,34
max EK	0,535	0,574	0,702	0,595	0,727	0,654

Tabuľka 3: Objektívne parametre impulzných odoziev Jotovho a Rafiiho reverberátoru nastavených tak, aby sa čo najviac približovali parametrom z tabuľky 2.

	Laboratórium		Chodba		Schodisko	
	Väänänen	Dattorro	Väänänen	Dattorro	Väänänen	Dattorro
RT [s]	0,564	-	1,05	1,06	1,34	1,34
EDT [s]	0,462	-	0,798	0,674	1,42	1,4
BR	1,02	-	1,05	1	1	0,996
HFR	1,2	-	1,25	0,998	1,24	1,05
C ₇ [dB]	-12,2	-	-18,9	-22,8	-32,9	-30
C ₅₀ [dB]	16,6	-	6,36	8,61	-6,29	-14
C ₈₀ [dB]	28,8	-	16	17	1,16	-4,44
D ₅₀ [%]	97,9	-	81,2	87,9	19	3,83
t _s [ms]	54,7	-	90,3	60,5	171	131
H [dB]	-16,6	-	-6,36	-8,61	6,29	14
max EK	0,625	-	0,706	0,796	0,877	0,966

Tabuľka 4: Objektívne parametre impulzných odoziev Väänänenovej a Dattorrovho reverberátoru nastavených tak, aby sa čo najviac približovali parametrom z tabuľky 2. Pri Dattorrovom reverberátore sa impulznú odozvu laboratória nepodarilo uspokojivo aproximovať.

Z tabuliek môžeme vidieť, že priblížiť sa k reálnym impulzným odozvám sa v práci podarilo iba čiastočne. Jednotlivé impulzné odozvy, ktorých hodnoty sú uvedené v tabuľkách je možné vidieť v prílohe A. Spomedzi všetkých reverberátorov sa najhoršie priestor aproximoval pomocou Jotovho reverberátoru nasledovaného Dattorrovým. U týchto spomínaných reverberátorov boli v experimente dosiahnuté najhoršie výsledky, pričom u Dattorovho reverberátoru sa nepodarilo priestor laboratória nasimulovať vôbec. Pri Väänänenovej a Rafiiho reverberátore sa podarilo dosiahnuť približných aproximácií priestorov, no i tak sa reverberátormi vytvorené impulzné odozvy v niektorých parametroch odlišujú od reálnych priestorov o nemalé hodnoty. Takisto časová náročnosť vytvorenia týchto aproximácií sa pohybovala rádovo v hodinách, v závislosti od reverberátoru.

5 Záver

Práca sa zaoberá akustickým priestorom a jeho syntetickým modelovaním pomocou reverberátorov. Cieľom práce bolo vytvoriť niekoľko štruktúr na simuláciu akustického priestoru a skript, ktorý bude z impulzných odoziev počítať vybrané objektívne parametre akustického priestoru. Súčasťou práce bol takisto experiment. Jeho úlohou bolo zmerať impulznú odozvu troch priestorov a následne sa tieto priestory posnažiť implementovanými reverberátormi čo najvernešie nasimulovať.

Všetky časti zadania boli vo väčšej miere splnené. Výstupom práce sú algoritmy štyroch vybraných reverberátorov. Každý z nich funguje na odlišnom princípe a dosahuje odlišné výsledky. Každý z reverberátorov využíva iné štruktúry a ich odlišné zapojenie. Tieto štruktúry a ich vlastnosti, rovnako ako ich vplyv na výslednú impulznú odozvu reverberátoru sú popísané v druhej kapitole tejto práce. V ďalšej kapitole sú popísané špecifiká jednotlivých implementovaných reverberátorov, spolu s princípom implementácie, ktorý bol u nich využitý. V kombinácii so skriptom na určenie objektívnych parametrov akustického priestoru z ľubovoľnej stereo alebo mono impulznej odozvy poskytujú tieto algoritmy základ na modelovanie reálnych akustických priestorov. Toto je ukázané pomocou experimentu, kde boli reálne priestory aproximované pomocou implementovaných reverberátorov. U jedného z reverberátorov sa nepodarilo aproximovať laboratórnu miestnosť s najkratšou dobou dozvuku. Práca takisto obsahuje zhodnotenie jednotlivých algoritmov na základe ich objektívnych vlastností, rovnako ako z hľadiska subjektívneho dojmu z reverberácie. Z porovnania vyšiel najlepšie Rafiiho reverberátor, postavený na princípe reverberátoru od Moorera.

Príloha obsahuje všetky programy implementované v tejto práci. K implementácií bolo použité prostredie Matlab vo verzii 7.7.0.471. Na priloženom DVD je krátky návod ako dané programy spustiť. Algoritmy obsahujú množstvo komentárov, ktoré objasňujú jednotlivé časti kódu. K jednotlivým reverberátorom boli vytvorené i grafické rozhrania, ktoré uľahčujú prácu a umožňujú jednoduchšie testovanie algoritmov pri aproximácii impulzných odoziev reálnych priestorov.

Literatúra

- [1] ADRIAENSEN, F. Acoustical Impulse Response Measurement with ALIKI, *4th International Linux Audio Conference*, Karlsruhe, 2006.
- [2] BALÍK, M. Číslicové spracování akustických signálů. Brno: FEKT VUT v Brně, 2010, 104 s.
- [3] BALÍK, M. Struktury pro simulaci poslechového prostoru. *Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT*, Brno, 2003
- [4] BALÍK, M. Použití analyzátoru MLSSA a příklady měření impulsových odezev v prostorách Purkyňova 118, *Elektrorevue*, 2003. č. 26 Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/03026/index.html>
- [5] BELTRÁN, F. A.; BELTRÁN, J. R.; HOLZEM N.; GOGU A. Matlab Implementation of Reverberation Algorithms, *Journal of New Music Research*, 2002, vol.31, no.2, s.153-161 ISSN 0929-8215.
- [6] BERANEK, L. Concert hall Acoustics. *J. Acoust. Soc. Am*, 1992, vol.92, no.1, s.1-39.
- [7] BERANEK, L. *Music, Acoustics and Architecture*. John Wiley and Sons, New York, 1962.
- [8] BERANEK, L. Concert and Opera Hall, How They Sound. *Published for the Acoustical Society of America by the American Institute of Physics*, 1996.
- [9] DATTORRO, J. Effect design. Part 1: Reverberator and Other Filters, *Journal of Audio Engineering Society*, 1997, vol. 45, no.9, s. 660 – 684.
- [10] DIETSCH, L. Objektive raumakustische Kriterien zur Erfassung von Echostorungen und Lautstarken bei Sprach und Musikdarbietungen, *Dissertation, Technische Universität Dresden*, 1983.

- [11] EVEREST, F.; POHLMANN K. C. *Master handbook of acoustics*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, c2009, xviii, 510 p. ISBN 00-716-0332-8.
- [12] FARINA, A. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique, *Audio Engineering Society Preprint 5093*, 2000
- [13] FRENETTE, J. Reducing Artificial Reverberation Requirements Using Time-variant Feedback Delay Networks, *University of Miami*, Florida, 2000
- [14] GOGU A.; TOPA M. Implementation Aspects of Jot's Reverberator, *Electrical Engineering Research Report.*, Nr. 9, 2000.
- [15] GRIESINGER, D. *The virtual Acoustic Room*, United States Patent, 5.109.419, 1992.
- [16] HAAS, H. Über den Einfluss eines Einfachechos auf die Hørsamkeit von Sprache, *Acustica (I)*, 1951, č. 2, str. 49–58.
- [17] HRDINA, Z.; VEJRAŽKA, F. Signály a Soustavy. Praha, Vydavatelství ČVUT 2000.
- [18] JOT, J.M. Efficient Models for Reverberation and Distance Rendering in Computer Music and Virtual Audio Reality, *International Computer Music Conference*, Thessaloniki, Greece, September 1997
- [19] JOT, J.M. Synthesizing Three-Dimensional Sound Scenes in Audio or Multimedia Production and Interactive Human-Computer Interfaces, *5th International Conference: Interface to Real & Virtual Worlds*, Montpellier, France, Mai 1996
- [20] KIM, Y. H.; AHN, S.T. Reverberation Model Based on Objective Parameters of Subjective Perception, *AES Journal Vol. 49*, No. 9, September 2001
- [21] LINDSAY, R. B. *Acoustics: Historical and Philosophical Developement*. Dowden, Hutchinson and Ross, 1973.

- [22] MOORER, J. A. About This Reverberation Business. *Computer Music Journal*, vol. 3, no. 2, 1979, s. 13-28.
- [23] RAFII, Z.; PARDO, B. A Digital Reverberator Controlled Through Measures of the Reverberation, Northwestern University, EECS Department Technical Report, NWU-EECS-09-08, 2009
- [24] ROSSING, Thomas D. Springer handbook of acoustics. New York, N.Y.: Springer, c2007, xxiv, 1182 p. ISBN 03-873-3633-8.
- [25] SCHROEDER, M. R. Natural-sounding artificial reverberation. *J. Audio Eng. Soc.*, 1962, vol.10, no.3, s.219-233.
- [26] SCHROEDER, M. R. New Method of Measuring Reverberation Time. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 37, 1965, s. 409-412.
- [27] SMITH, J. O. FDN Reverberation[online]. 2005 [cit.2013-12-28]. Dostupné z: https://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/FDN_Reverberation.html
- [28] STAUTNER, J.; PUCKETTE M.. Designing Multi-Channel Reverberators. *Computer Music Journal*. 1982, no. 6
- [29] VÄÄNÄNEN, R.; VÄLIMÄKI, V.; HUOPANIEMI, J.; KARJALAINEN, M. Efficient and Parametric Reverberator for Room Acoustics Modelling, *International Computer Music Conference*, Thessaloniki, 1997, s. 200 – 203.
- [30] VÄÄNÄNEN, R. Efficient Modeling and Simulation of Room Reverberation. *Department of Electrical and Communications Engineering, Helsinki University of Technology*, 1997
- [31] VONDRÁŠEK, M.; ANTEK, M., ml. Porovnání objektivních kritérií kvality koncertních sálů. *Akustické listy*. Září 2005, ročník 11, číslo 3. Dostupné z URL: <<http://www.czakustika.cz/listy/casopis/11-3.pdf>>

Zoznam použitých skratiek a symbolov

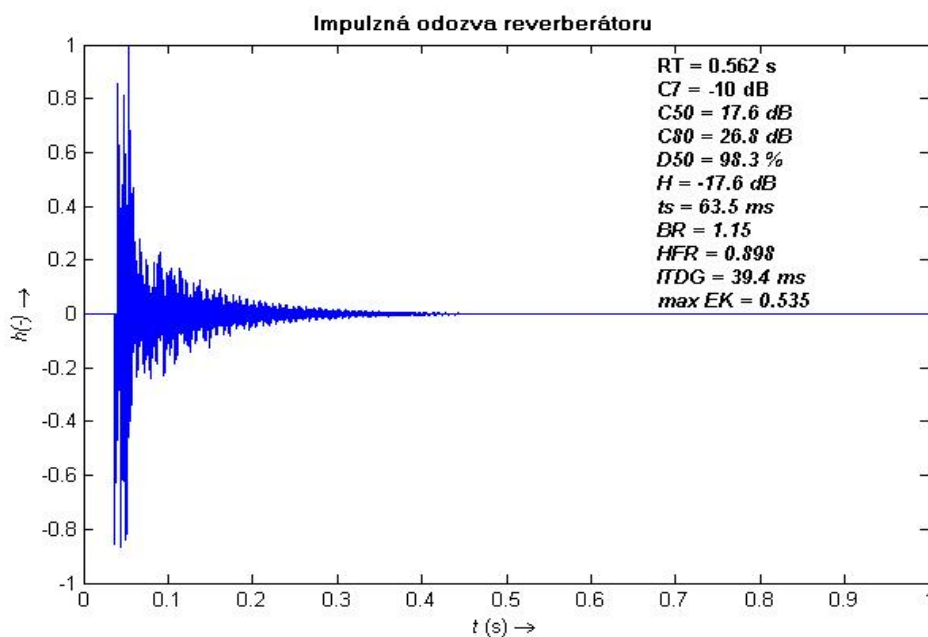
BR	Bass Ratio
C	Clarity
C ₇	Miera priameho zvuku
C ₅₀	Miera zreteľnosti
C ₈₀	Miera jasnosti
D	Objective Clarity
D ₅₀	Objective clarity
DSP	Digital SignalProcessing
EDT	Early Decay Time
EK	Echo Criterion
FFT	Fast Fourier Transform
FIR	Finite Impulse Response
FDN	Feedback Delay Network
G	Strength of Arriving Energy
H	Reverberance Measure
HFR	High Frequency Ratio
IACC	Inter Aural Cross correlation Coefficient
IACF	Inter Aural Cross correlation Function
IIR	Infinite Impulse Response
ITDG	Initial Time Delay Gap
MLS	Maximum Length Sequences
RT	Reverberation Time
t _s	Čas ťažiska impulznej odozvy
UFDN	Unitary Feedback Delay Network
WAV	Waveform Audio File

Zoznam príloh

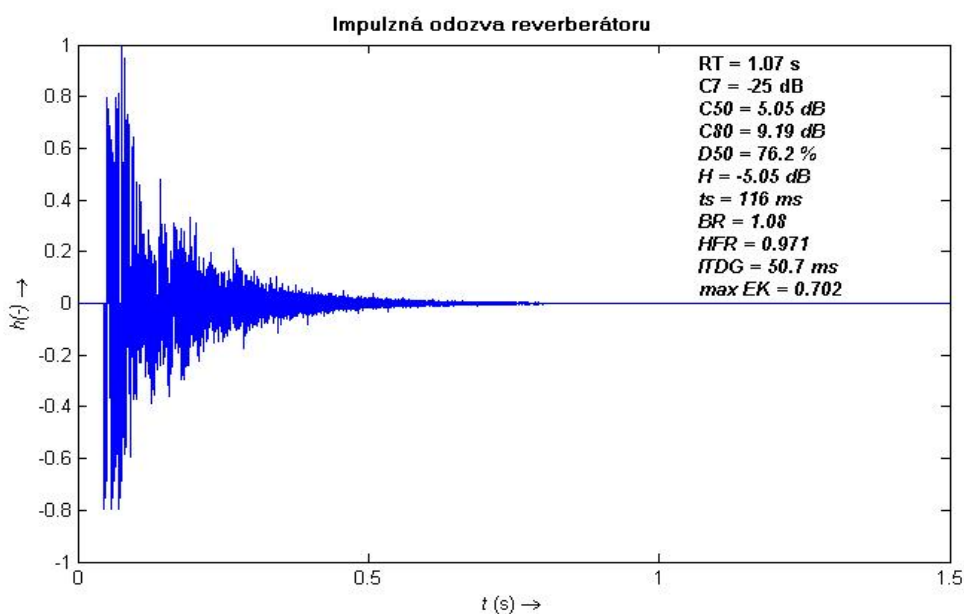
- A Aproximované impulzné odozvy reálnych priestorov**
- B DVD príloha**

A Aproximované impulzné odozvy reálnych priestorov

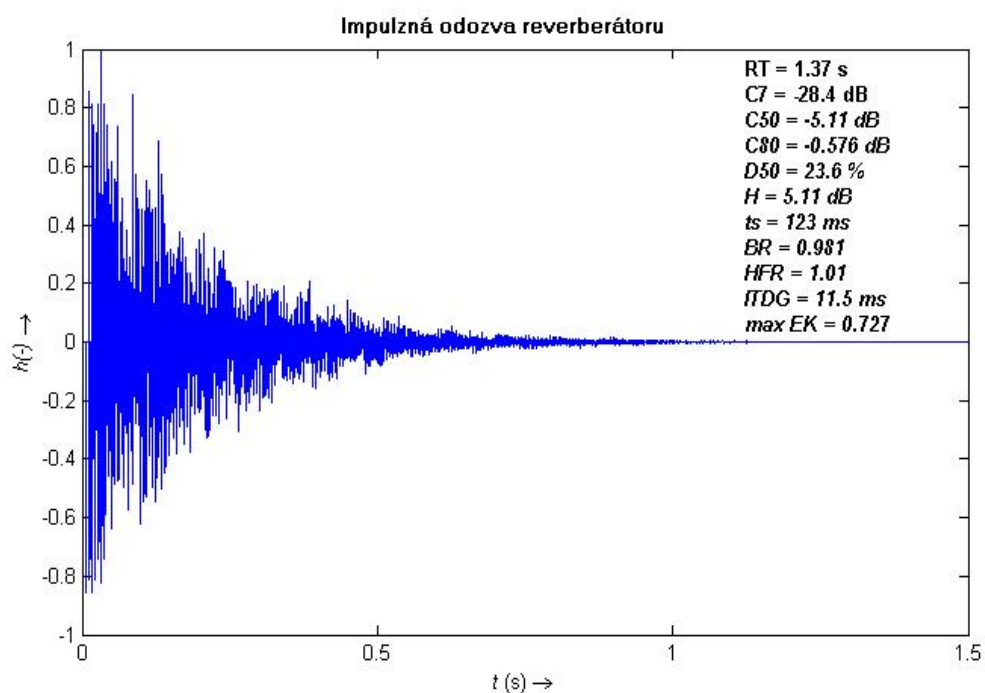
Nižšie sú zobrazené impulzné odozvy reverberátorov, ktoré sa snažili aproximovať reálne priestore pri experimente v kapitole č.4. Impulzné odozvy boli normalizované k maximálnej hodnote 1.



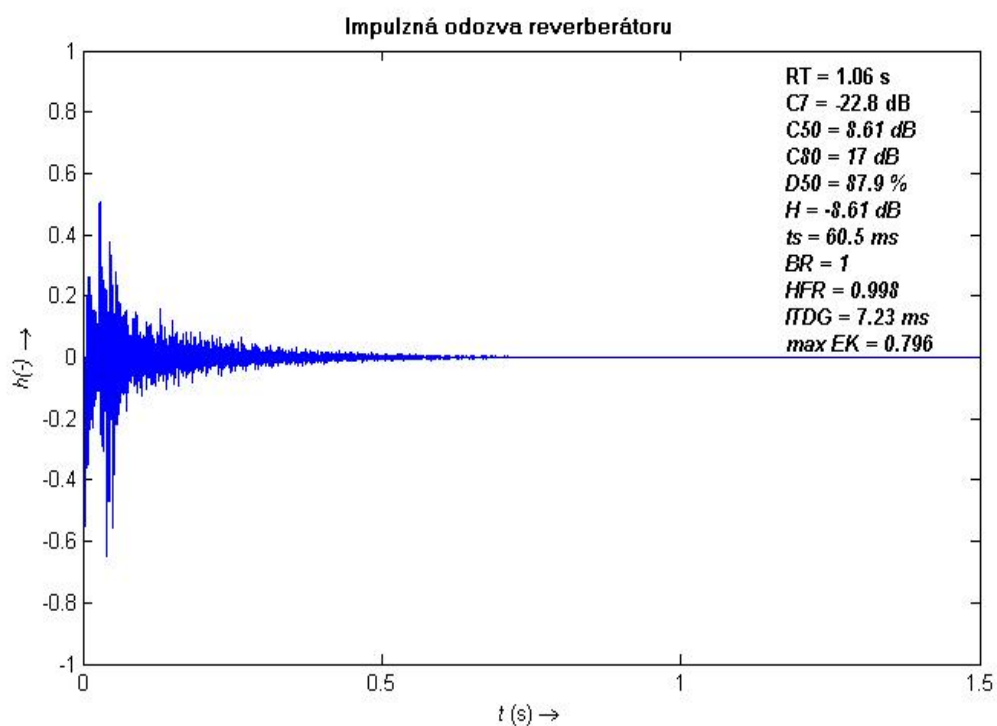
Obr. A.1: Aproximácia laboratória Rafiio reverberátorom.



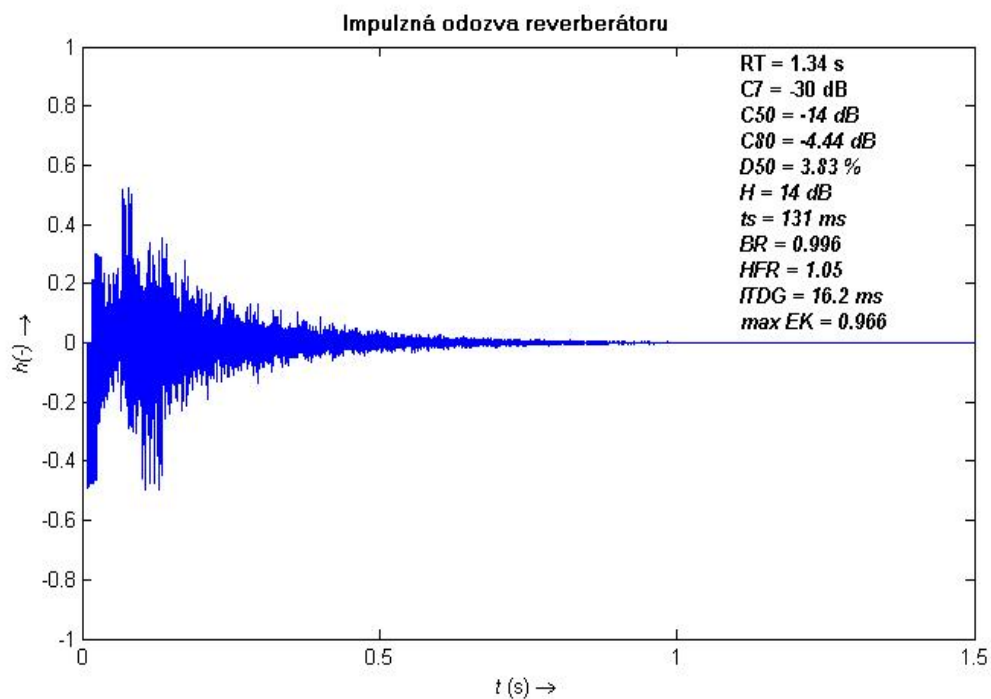
Obr. A.2: Aproximácia chodby Rafiio reverberátorom.



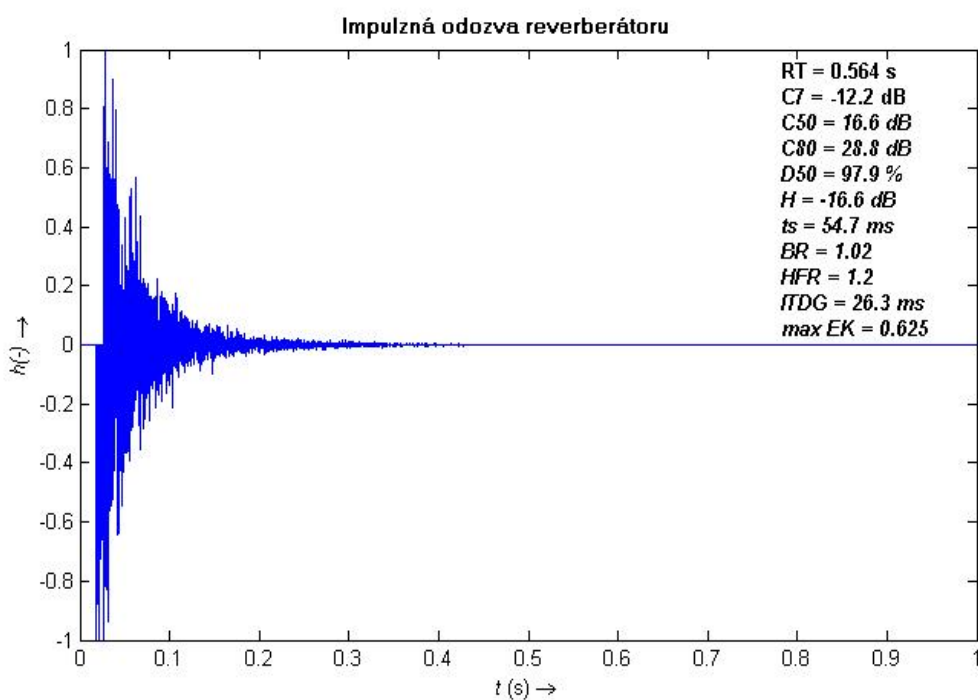
Obr. A.3: Aproximácia schodiska Rabinovich reverberátorom.



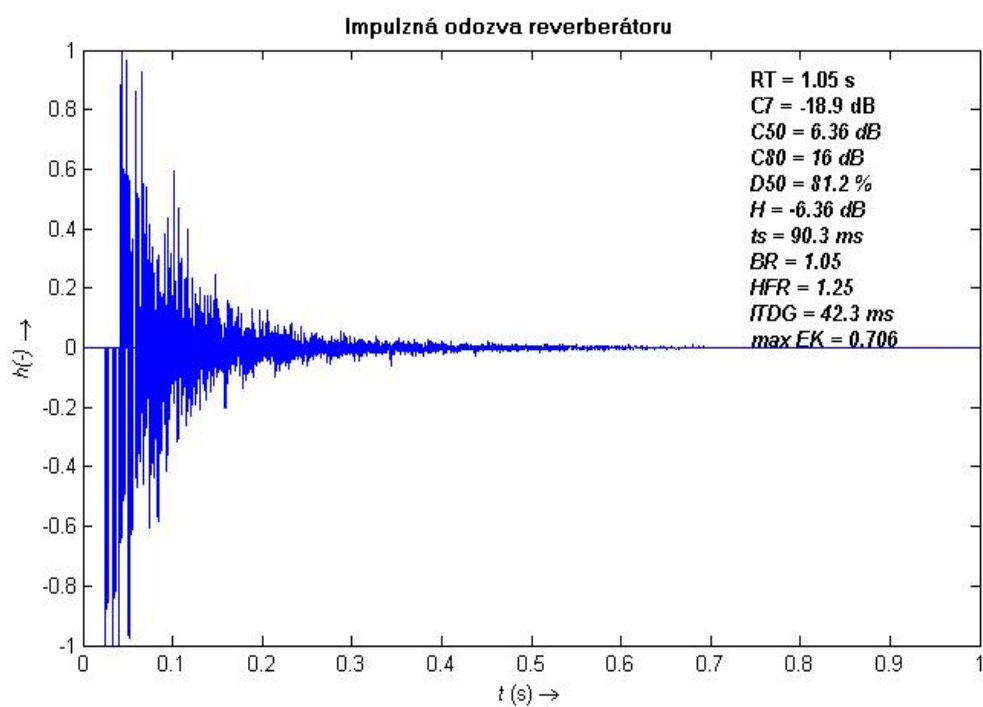
Obr. A.4: Aproximácia chodby Dattorrovým reverberátorom.



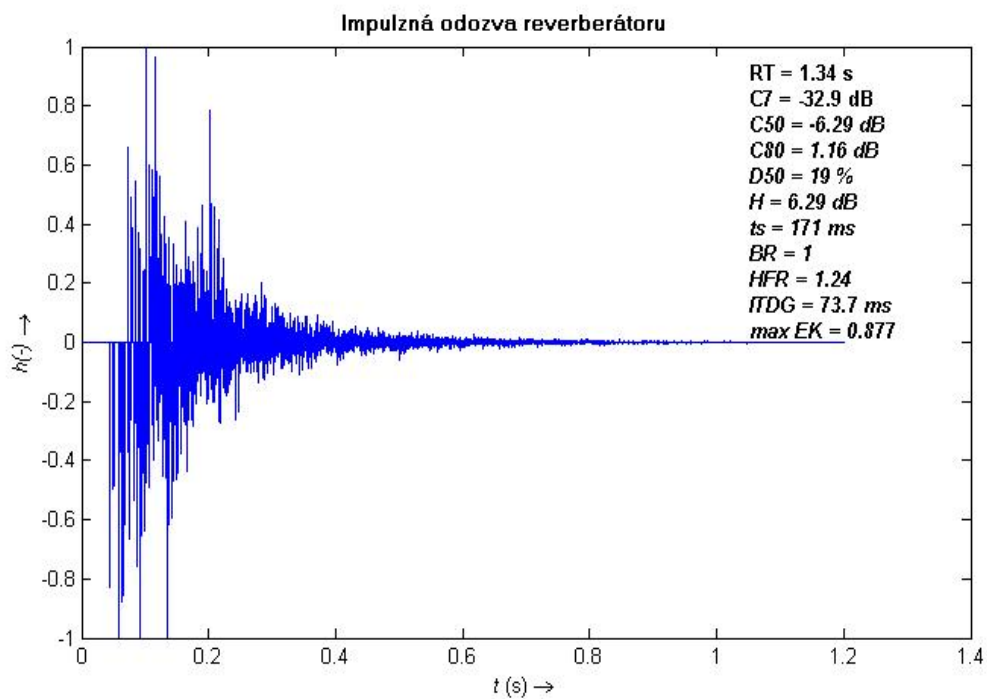
Obr. A.5: Aproximácia schodiska Dattorrovým reverberátorom.



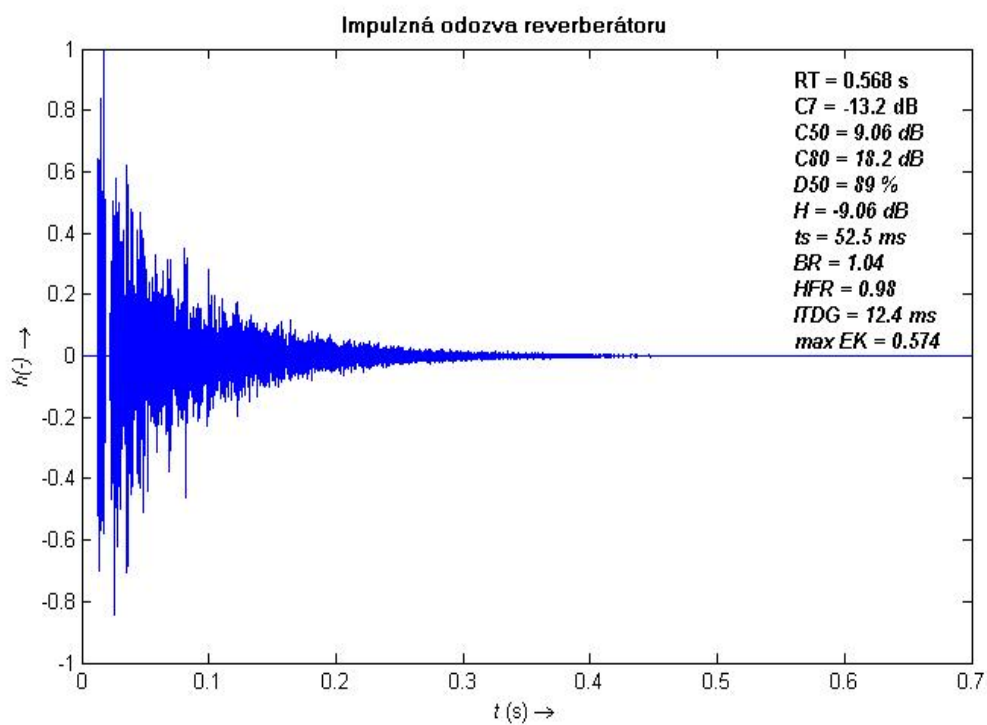
Obr. A.6: Aproximácia laboratória Väänänenovej reverberátorom.



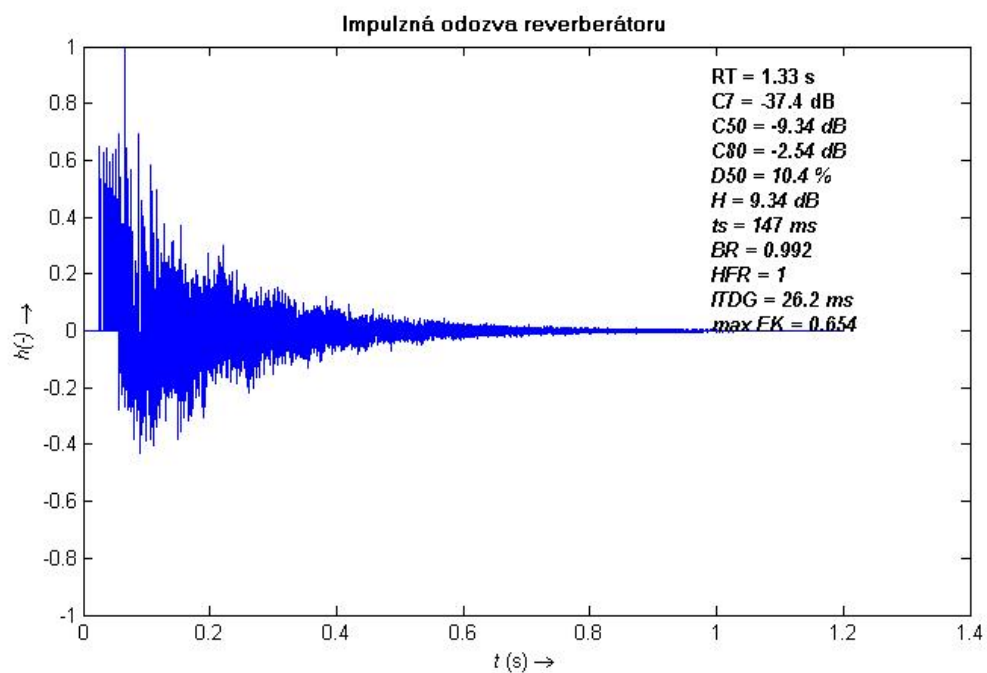
Obr. A.7: Aproximácia chodby Väänänenovej reverberátorom.



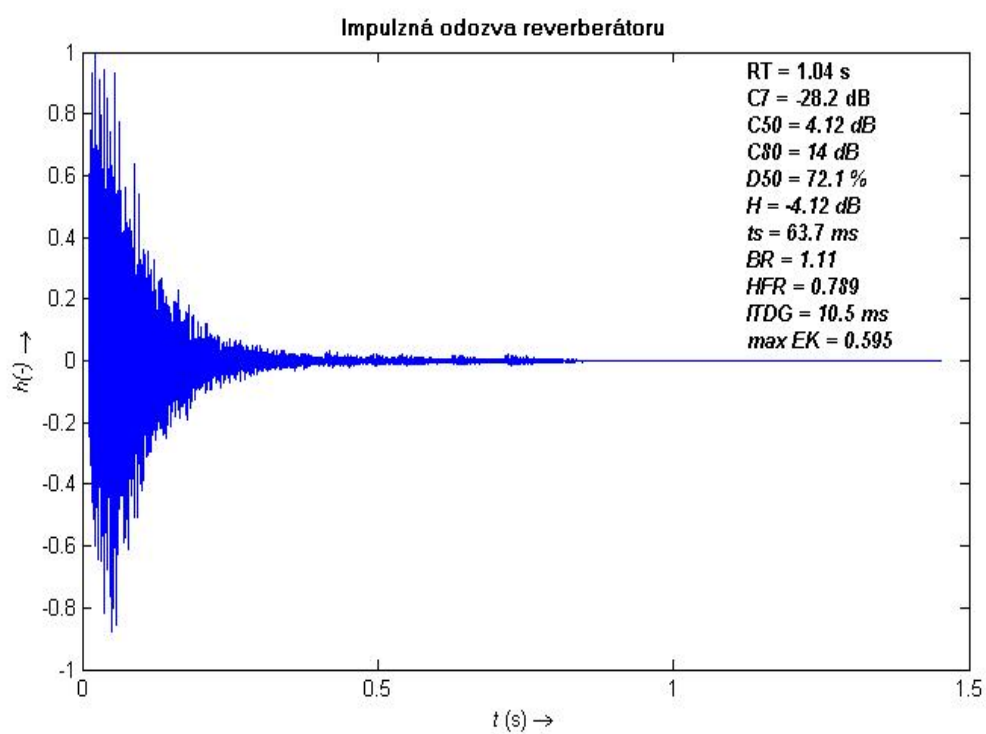
Obr. A.8: Aproximácia schodiska Väänänenovej reverberátorom.



Obr. A.9: Aproximácia laboratória Jotovým reverberátorom.



Obr. A.10: Aproximácia schodiska Jotovým reverberátorom.



Obr. A.11: Aproximácia schodiska Jotovým reverberátorom.

B DVD príloha

Na priloženom DVD sa nachádzajú štyri naimplementované reverberátory plus skript na získanie objektívnych parametrov akustického priestoru. Na DVD disku je priložený krátky manuál v pdf súbore, ktorý popisuje ako je možné algoritmy spustiť. Každý priečinok v sebe obsahuje dve verzie reverberátoru – jednu naimplementovanú ako funkciu v Matlabe, a druhú so sufixom gui, ktorá obsahuje aj grafické rozhranie. V priečinku zvuky sa nachádzajú skúšobné zvuky na ktorých boli reverberátory testované.

Na implementáciu bol použitý program Matlab vo verzii 7.7.0.471 (R2008b).